LA VIDA INTERNA DEL PROTON • ALIMENTOS TRANSGENICOS

INVESTIGACION y CIENCIA

JUNIO 2001
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Células madre sanguíneas

- Tormentas espaciales
- Raíz de la violencia
- Origen mineral de la vida



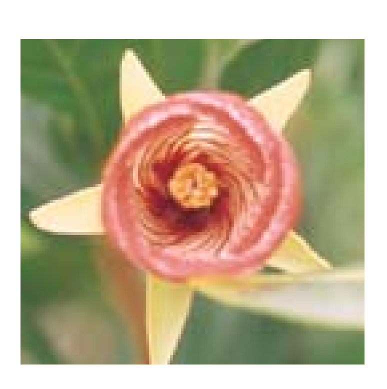


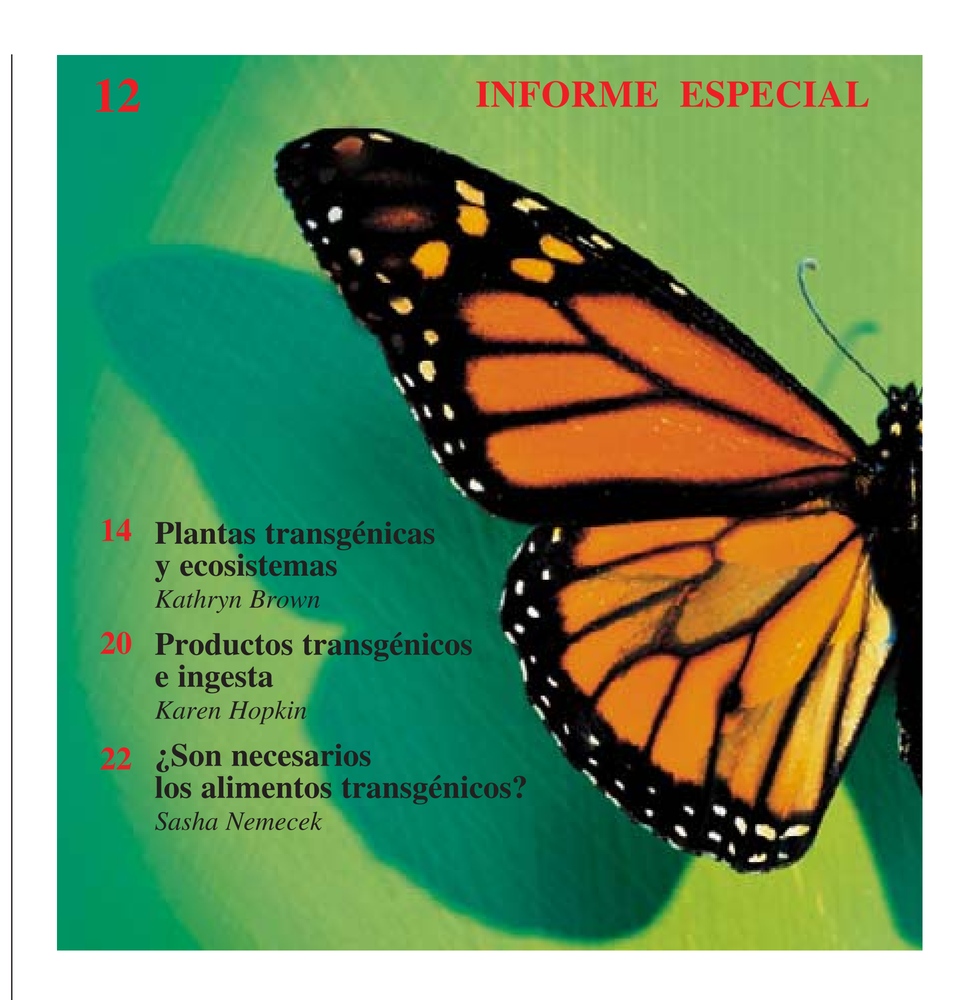
Junio de 2001 Número 297

SECCIONES

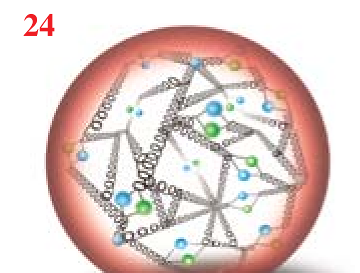












SECCIONES



Portada: Robert Lewis

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
7-11	Max Aguilera-Hellweg
12-15	Pete McArthur
17-18	Joe Zeff
20	Pete McArthur
22-23	Tom Wolff
24-25	Desy/Spektrum der Wissenschaft
26-28	Desy
29	Desy/Spektrum der Wissenschaft
30	Desy
40-41	Cortesía de E. Hivon y K. Górski
42	Alejandro Gangui
43	Cortesía de U. Seljak
44	Cortesía de M. Zaldarriaga
45	Cortesía de P. Steinhardt
49	Robert Lewis
50	Cortesía del Museo Americano de Historia Natural con permiso del Dept. de la Tierra y Ciencias Planetarias
51	Robert Lewis
52	Kenneth Eward
53-54	Cortesía de Lawrence H. Conklin
55	Robert Lewis
56-57	NASA/ESA, SOHO/LASCO Consortium
59	Joe Zeff
60-61	NASA/ESA, SOHO (*Imágenes solares*); NASA/Image Fuv Team (*auroras*); NASA/Image Hena Team (*anillo solar*); World Data Center for Geomagnetism, Kioto (*gráfica*)
63	NASA/Image Hena Team (*nube iónica*); E. Mayfield (*sonda*)
64	NASA/Image Euv Team
66-67	Dan Winters
69-70	Cortesía de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill
71	Cortesía de la Universidad de Pennsylvania
72-73	Joe Zeff
74	Dan Winters
77-81	Tina West
84	Wolfgang Bürger
85	Maris Bishofs
88-89	Joe Zeff
90	Vlad Guzner

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Esteban Santiago: *La sangre del cordón umbilical*; Luis Bou: *Plantas transgénicas y ecosistemas, Productos transgénicos e ingesta, ¿Son necesarios los alimentos transgénicos?, De cerca* y *Aventuras problemáticas*; Emilio Elizalde: *El interior del protón*; Juan Pedro Campos: *Origen mineral de la vida*; M.ª Rosa Zapatero: *Tormentas espaciales*; José Manuel García de la Mora: *Raíces de la violencia*; J. Vilardell: *Hace...* e *Ideas aplicadas*; Jürgen Goicoechea: *Taller y laboratorio*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORIAL DIRECTOR, ON-LINE Kristin Leutwyler
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky, George Musser y Sarah Simpson
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.500 pta.	21.500 pta.
	69,12 euro	129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

LA CAJA TONTA. «Como preparativo de las audiencias públicas a mantener ante la Comisión Federal de Comunicaciones recientemente se ha elaborado un estudio sobre los programas de televisión. Aproximadamente el tres por ciento de las emisiones semanales se dedican a programas científicos e informativos. Pero la mayoría de los programas de entretenimiento no se salen de las superficialidades más trilladas. Una deprimentemente alta proporción del 'entretenimiento' ofrecido por la TV resulta carente de inspiración, monótono y degradante para la dignidad humana.»

SOBRESALIENTE EN QUÍMICA. «El mes pasado, Robert B. Woodward, químico de Harvard, anunció un avance al momento reconocido como un hito en la historia de la química: la síntesis completa de un esteroide. El esteroide de Woodward es un producto sintético estricto, distinto de cualquier sustancia natural. Pero como, en numerosos casos, se ha convertido un esteroide en otro, este logro abre el camino hacia la síntesis completa de esteroides naturales, así la cortisona, la testosterona y la progesterona. A partir del esteroide sintético podría producirse cortisona mediante algunas reacciones químicas sencillas. Actualmente la síntesis de cortisona requiere 37 pasos partiendo de un componente de la bilis que escasea hasta tal punto, que se necesitan 40 reses para suministrar la cortisona de un día a un paciente artrítico.»



Antes del escúter: Idea monorrueda de 1901

...cien años

ARMAMENTOS KRUPP. «Los establecimientos metalúrgicos Krupp, en la cuenca del Ruhr, forman hoy el mayor complejo industrial del mundo. El primero de abril de 1900, el número de personas empleadas por Friedrich Krupp era de 46.679. A finales de 1899, las acerías de Essen habían fabricado y vendido 38.478 cañones. Las instalaciones Krupp no limitan su actividad a la fabricación de cañones, municiones y accesorios, sino que producen lo que un folleto llama 'material pacífico', es decir, ruedas para vehículos, raíles, piezas de fundición de acero para buques, etc.»

FIEBRE AMARILLA. «El Jefe del Cuerpo Médico del Ejército de EE.UU. ha aprobado el informe de un comité médico especial, el cual ha llegado a la conclusión de que el responsable de la transmisión de la fiebre amarilla es el mosquito. El departamento médico trabaja para poner en práctica los procedimientos preventivos de la enfermedad. Se recomienda un uso generoso de petróleo para evitar la incubación de los huevos del insecto.» [*Nota de la Redacción: El informe fue presentado por el bacteriólogo Walter Reed.*]

¿CON SÓLO UN CABALLO? «Nuestra ilustración muestra un curiosísimo invento de Mitchell R. Heatherly, de Mundell (Kansas): un vehículo monorrueda. El artefacto consiste en una viga curva articulada al arnés y de una rueda nada más. Sobre el eje de ésta hay estribos para el pasajero.»

...ciento cincuenta años

ERA DE HIERRO DE LOS BARCOS. «Para el comité inglés de navegación a vapor de Lord Jocelyn, el capitán Claxton facilitó pruebas en favor de los vapores de hierro y de las hélices; en su opinión serán la fuerza motriz de las embarcaciones marinas, antes de que pasen muchos años. Las ventajas que atribuye a los buques de construcción metálica son la durabilidad, economía de las reparaciones, mayor capacidad en proporción al tonelaje que los buques de madera, salubridad y andar suave. Respecto a la durabilidad, describió el estado del *Great Britain*, expuesto muchos meses a una serie de fuertes tempestades en la bahía irlandesa de Dundrum.»

ANESTÉSICO TÓPICO. «Los reparos puestos al uso del cloroformo se debían al riesgo de sofoco o de otros posibles peligros de paro total de algunas funciones del organismo. Pero de Berlín llegan noticias de una nueva aplicación que se afirma elude el peligro. De 10 a 20 gotas del fluido se dejan caer sobre la parte afectada o sobre una venda de hilas y luego se pone una venda de tafetán impermeable. Al cabo de dos a diez minutos, la parte se queda insensible y ya no se siente el dolor, sea éste reumático, nervioso o de otros trastornos.»

LUCES FALSAS. «Hace tres años que en Inglaterra sólo se oía hablar de la 'Luz Eléctrica Staite'. Patentada, divulgada y proclamada de un confín del mundo al otro, iba a enviar sin tardanza a la oscuridad del Averno a todas las compañías de gas, y tan intenso era el entusiasmo (pues a tales influencias no escapan ni los más astutos ni los más prudentes) que los títulos de las compañías de gas bajaron muchísimo. Pues bien, hace pocas semanas esa luz eléctrica se declaró insolvente y llevada a los tribunales por los indignados acreedores.»

La sangre del cordón umbilical

Lo mismo que la placenta, el cordón contiene células madre que pueden rehacer la sangre y el sistema inmunitario de personas con leucemia y otros tipos de cáncer

Ronald M. Kline

Con cara arrugada, húmedo y chillón, así entra el recién nacido en nuestro mundo. Los padres, contentos, empiezan a contar diez perfectos deditos en manos y pies; apenas si prestan atención a la segunda acta del nacimiento: la expulsión de la placenta, o las secundinas.

Tras los dolores del parto, la madre se siente aliviada porque sólo le queda un último esfuerzo para que el médico recoja la placenta, órgano en forma de hogaza que ha servido para alimentar al bebé durante nueve meses a través del cordón umbilical. Tras cortar el cordón y cerciorarse de que la placenta está entera y sin rasgaduras (cualquier fragmento dejado en el útero podría acarrear una infección potencialmente fatal), el médico la deposita en un recipiente de acero inoxidable con el resto de residuos para su incineración.

Pero cada vez es mayor el número de ginecólogos y padres que se percatan del valor de lo que se creía un subproducto del desecho. Desde 1988 se han salvado centenares de vidas con los 100 gramos escasos de sangre contenidos en la placenta y el cordón umbilical. Esa sangre constituye una fuente rica en células madre hematopoyéticas, precursoras de cualquier especie celular sanguínea, desde los leucocitos que combaten la infección hasta los hematíes que transportan el oxígeno y las plaquetas que facilitan la coagulación en una herida.

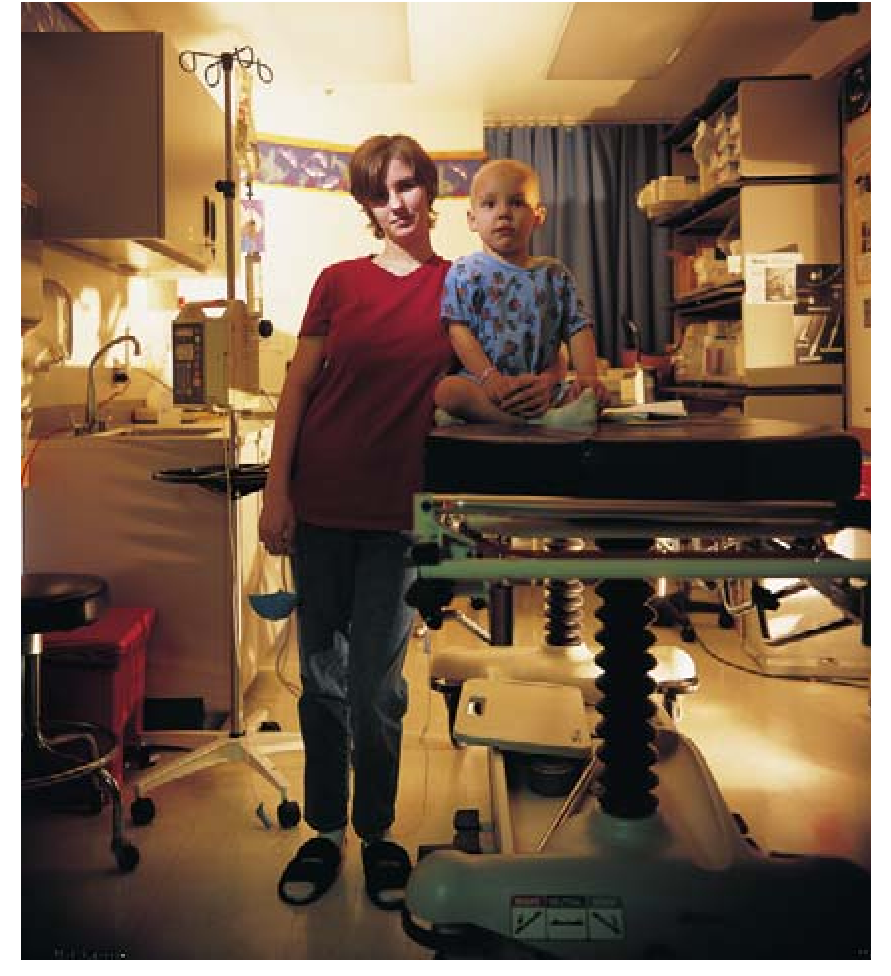
Las células madre, o troncales, extraídas de una sola placenta son suficientes para reconstituir la sangre y el sistema inmunitario de un niño con leucemia, cuyos leucocitos se dividen de un modo anómalo y hay que destruirlos con quimioterapia. En el pasado, los médicos tenían que buscar un donante para proporcionar a estos niños un trasplante de médula ósea, que produce nueva sangre y células inmunitarias. Por desgracia, muchos infantes morían durante la búsqueda prolongada de un donante con un tipo de tejido compatible o que no generase complicaciones si la médula ósea no era absolutamente compatible. La sangre del cordón presenta menos problemas de compatibilidad y no suele provocar complicaciones, porque sus células troncales difieren, inmunológicamente hablando, de la médula en el adulto, a la vez que son más tolerantes.

Los beneficios del empleo de sangre del cordón han quedado patentes en la leucemia. Pero el proceso admite más usos. Las células madre de la sangre del cordón ayudan a renovar los hematíes normales en personas con anemia falciforme y a restablecer el sistema inmunitario de los niños nacidos con inmunodeficiencia combinada grave. Se recurre a la sangre del cordón umbilical para tratar deficiencias enzimáticas hereditarias, como el síndrome de Hurler, que conduce a una degeneración neurológica progresiva con resultado de muerte. En tales casos, las células troncales de la sangre del cordón no sólo generan hematíes normales y leucocitos, sino también otras células cerebrales de sostén, la microglía, que aportan la enzima clave ausente.

Ante las ventajas manifiestas del trasplante de sangre del cordón umbilical, numerosos hospitales e institutos clínicos ha establecido bancos donde la madre pueda depositar sangre del cordón umbilical de su hijo en beneficio de quien pueda necesitarla. Por citar un caso entre varios, el Programa de Sangre de



1. LA SANGRE DEL CORDON UMBILICAL constituye una fuente rica en células madre hematopoyéticas, precursoras de los leucocitos que combaten la infección, de los hematíes, que transportan el oxígeno, y de las plaquetas que facilitan la coagulación en una herida. En la foto, los médicos pinzan el cordón umbilical de un niño que nace por sección cesárea.



2. LAS CELULAS MADRE, o troncales, pueden reconstituir la sangre y el sistema inmunitario de un niño con leucemia, cuyos leucocitos se dividen de un modo anómalo y hay que destruirlos con quimioterapia. Eso es lo que espera Kristina Romero (*fotografía*), embarazada de cuatro meses, que piensa usar la sangre del cordón umbilical para su otro hijo, Chase, al que vemos internado en el hospital Tulane de Nueva Orleans. Desde 1988 se han salvado centenares de vidas con los 100 gramos escasos de sangre contenidos en la placenta y el cordón umbilical.

Placenta del Hospital de Sangre de Nueva York, dirigido por Pablo Rubinstein, ha recogido hasta el momento 13.000 donaciones de sangre.

Pero como ocurre con muchos nuevos sectores de la ciencia, el trasplante de sangre del cordón plantea algunas cuestiones éticas. ¿Quién es el dueño de la sangre: los dos progenitores, la madre sola o el niño? ¿Qué sucede si una madre dona la sangre del cordón umbilical de su hijo a un banco y después el niño sufre una leucemia y la necesita? Los dilemas morales se agravan con la comercialización de ese bien, con el establecimiento de compañías que recogen y conservan la sangre del cordón de un recién nacido para el posible uso de la familia en algún momento posterior. ¿Es legítimo que las compañías comercialicen ese tipo de servicios cuando la posibilidad de que un niño necesite su sangre oscila entre 1 de cada 10.000 (según el Hospital de Sangre de Nueva York) y 1 de cada 200.000 (según el Instituto Nacional de la Salud)?

Fuentes de células madre

La primera pista de que la sangre del cordón umbilical pudiera encerrar interés clínico apareció en 1972, cuando Norman Ende, de la Universidad de Nueva Jersey, y su hermano Milton, médico de Petersburg, publicaron que habían administrado a un paciente de 16 años con leucemia una transfusión de sangre de cordón umbilical. Semanas después descubrieron que la sangre del muchacho contenía hematíes identificables como procedentes del donante.

Pese a quedar demostrada la eficacia del método, tuvieron que pasar años antes de que otros médicos reconocieran las posibilidades que se abrían. En 1989 Hal E. Broxmeyer, de la facultad de medicina de la Universidad de Indiana, y Edward A. Boyse, del Instituto Sloan-Kettering de Oncología de Nueva York, reavivaron el interés por la técnica al demostrar que la sangre del cordón umbilical humano contenía tantas células madre como la médula ósea. Aquel mismo año Broxmeyer y Eliane Gluckman, del Hospital Saint-Louis de París, informaron de la curación obtenida de una anemia de Fanconi —alteración genética letal— de un niño de cinco años aprovechando la sangre del cordón umbilical de su hermanita. Desde entonces, aproximadamente el 75 por ciento de los trasplantes de sangre de cordón umbilical han hecho uso de sangre de cordón de una persona no emparentada.

Histocompatibilidad

Con el trasplante de la sangre del cordón umbilical se pretende obtener una fuente de células troncales hematopoyéticas que resulte compatible, en el máximo grado posible, con el tipo de tejido del paciente receptor. El tipo de tejido viene determinado por un conjunto de genes que producen las proteínas llamadas antígenos leucocitarios humanos (HLA), que se encuentran en la superficie de todas las células del organismo. El sistema inmunitario reconoce como normales las células que exponen las proteínas que siempre ha encontrado desde el nacimiento, y las considera como propias. Reputará impropia o foránea cualquier otra proteína HLA y eliminará de inmediato a las células que la exhiban.

Existen seis genes HLA principales. De cada uno el sujeto presenta dos copias, o alelos, uno de cada progenitor. (Cada alelo puede existir en más de 30 tipos diferentes.) Para los trasplantes de médula ósea, se procura la coherencia de al menos los seis alelos (de un total de 12) que revisten mayor importancia clínica en el tras-

El autor

RONALD M. KLINE dirige el servicio de hematología y oncología infantil en el Hospital Pediátrico del Atlántico en Florham Park, Nueva Jersey, donde trabaja desde 1998.

plante. Ahora bien, desde el punto de vista inmunitario las células del cordón umbilical difieren de las células de la médula ósea; gracias a ello, se pueden usar muestras de sangre de cordón que sea coherente en cinco alelos HLA, o incluso en tres.

La información genética para sintetizar las proteínas HLA se encuentra en el cromosoma 6. (Todos los individuos normales presentan dos copias del cromosoma 6.) De acuerdo con las reglas de la genética, la probabilidad de que dos hermanos hereden el mismo cromosoma 6 materno y paterno —y por tanto sean coherentes desde el punto de vista del tejido— es sólo del 25 por ciento.

Recibir un trasplante de médula ósea de alguien cuyo tejido no sea coherente puede acarrear consecuencias letales. De un lado, el injerto puede fallar si las células del sistema inmunitario del receptor, por mermadas que estén, generan una respuesta inmunitaria y matan las células trasplantadas, al considerarlas foráneas. Este injerto fracasado deja al paciente sin un sistema inmunitario operativo, a merced de las infecciones. En el extremo opuesto, las células trasplantadas pueden atacar el organismo del receptor, al que reputan extraño; se trata de una reacción terrible conocida por rechazo heterólogo. Esa agresión del injerto contra el huésped se manifiesta a través de una erupción cutánea con ampollas y úlceras, una alteración hepática que progresa hasta el fallo hepático o una hemorragia gastrointestinal grave. Puede producir rápidamente la muerte.

Para paliar la falta de trasplantes de médula ósea procedentes de un hermano adecuado, se creó, a instancias de diversos bancos de sangre, el Programa Nacional de Donantes de Médula Osea, norteamericano, para confeccionar un registro de donantes óptimos de acuerdo con las peculiaridades de los pacientes. El programa, junto con otros semejantes en todo el mundo, tiene 6,5 millones de inscritos. Puesto que la probabilidad de que un individuo encaje con otro que no es pariente suyo es de uno entre 400, los necesitados de trasplante tienen apenas una probabilidad del 60 por ciento de encontrar un donante potencial. La suerte se halla todavía más alejada para los pacientes de grupos étnicos minoritarios, porque hay mayor probabilidad de coherencia en el seno de una misma raza. (Los registros, además, no cuentan con suficientes voluntarios pertenecientes a las minorías.)

Ni siquiera los que encuentran un donante adecuado dejan de correr un riesgo altísimo (nada menos que un 80 por ciento) de sufrir un rechazo heterólogo. Tal peligro se atribuye al proceso de búsqueda de compatibilidad, que no toma en consideración las proteínas secundarias del grupo HLA.



3. UNA PLACENTA y cordón umbilical listos para la recogida de la sangre. Procede luego acometer una serie de pruebas que garantice el buen estado sanitario de la misma, exenta de deficiencias génicas y virus. La recogida de sangre de cordón del mayor número posible de donantes aumentará la posibilidad de que los enfermos de grupos minoritarios encuentren un donante compatible, lo que no ocurre con la médula ósea.

Aunque estas proteínas no se determinen tampoco en el caso de trasplantes entre hermanos, el estrecho parentesco genético garantiza que muchas proteínas menores resulten compatibles. Con todo, las homologías entre hermanos no evitan un riesgo del 20 por ciento de rechazo heterólogo.

Para reducir la incidencia del rechazo se podría intentar emparejar todas las proteínas HLA conocidas, pero eso supondría limitar drásticamente las posibilidades de encontrar un donante potencial para un receptor. El trasplante de sangre del cordón umbilical ofrece una opción mejor. En razón del desarrollo incompleto del sistema inmunitario en el recién nacido, es menos probable que, comparadas con las células de la médula ósea de un niño mayor o de un adulto, las células inmunitarias de la sangre del cordón umbilical reconozcan como extraños los tejidos del receptor y decreten su aniquilación.

En 1997 el equipo de Gluckman demostró que el trasplante de la sangre del cordón umbilical —incluso entre donantes y receptores no emparentados— era más seguro que el trasplante de médula ósea. Analizaron 143 pacientes que habían recibido trasplantes de sangre de cordón umbilical de parientes o de un programa de donantes. Aunque los trasplantes evidenciaban un grado de compatibilidad que iba del 100 por ciento hasta sólo un 30 por ciento, la incidencia de rechazo heterólogo fue sólo del 5 por ciento entre personas emparentadas y del 20 por ciento entre individuos sin relación de parentesco. El rechazo produjo la muerte en sólo el 1 por ciento de los pacientes emparentados y el 6 por ciento de los no emparentados. En comparación, se ha comprobado que los donantes de médula sin relación de parentesco aunque compatibles en un 100 por ciento ofrecían una incidencia de 47 por ciento de rechazo potencialmente letal y un 70 por ciento de éstos (33 por ciento del total de pacientes) pereció.

El trasplante de sangre del cordón umbilical ofrece otras ventajas sobre los trasplantes de médula ósea. La amplitud del grupo de donantes potenciales de sangre de cordón es mucho mayor. El Programa Nacional de Donantes de Médula Osea ha tardado más de un decenio en reunir un conjunto de cuatro millones de individuos tipificados para una posible donación de médula ósea. (Los otros 2,5 millones de donantes corresponden a registros de países distintos de los Estados Unidos.) Pero cada año se producen en esa nación unos cuatro millones de nacimientos, y cada uno es una oportunidad potencial de recoger la sangre del cordón. El Hospital de Sangre de Nueva York ha podido ofrecer un donante adecuado hasta en el 85 por ciento de las peticiones usando un conjunto de sólo 13.000 muestras almacenadas; esa cifra corresponde sólo a los nacimientos de un día en los Estados Unidos.



4. UNA MUESTRA DE SANGRE de cordón umbilical conservada en el Hospital de Sangre de Nueva York. Ese centro ha podido ofrecer un donante adecuado hasta en el 85 por ciento de las peticiones usando un conjunto de sólo 13.000 muestras almacenadas.

La sangre del cordón aporta también la ventaja de la rapidez. En la identificación de un donante de médula ósea sin relación de parentesco se tarda cuatro meses en promedio. Durante ese período, se solicita a los donantes potenciales que acudan al centro especial de recogida de sangre, donde se analizará su compatibilidad y la ausencia de infecciones víricas (sida o hepatitis, por ejemplo). Una vez seleccionado el donante, éste debe volver, pasar un examen físico, dar su consentimiento informado y después fijar el momento para que se le extraiga, vía punción, médula ósea de la cresta ilíaca.

Por el contrario, la sangre del cordón está disponible en el congelador del banco y ha pasado ya las pruebas de ausencia de virus y la tipificación hística. Eso significa que el dar con una muestra de sangre de cordón umbilical compatible con el paciente se alcanza en tres o cuatro días, un tiempo vital para alguien que en ese momento sea inmunodeficiente y se encuentre en un riesgo elevado de infecciones.

Además, la recogida de sangre de cordón umbilical del mayor número posible de donantes aumentará la posibilidad de que los enfermos de grupos minoritarios encuentren un donante compatible. Según el Programa Nacional de Donantes de Médula Osea, los negros tienen sólo una probabilidad del 57 por ciento de hallar un donante de médula ósea. Los procedentes de Asia oriental e islas del Pacífico tienen hasta un 74 por ciento; los de origen iberoamericano y residentes en los Estados Unidos, un 78 por ciento; y entre los amerindios y los nativos de Alaska esa probabilidad se eleva hasta el 84 por ciento. En los caucasianos la probabilidad llega al 87 por ciento.

La sangre del cordón debería también ofrecerse exenta de un virus que en el pasado fue responsable



5. LA SANGRE del cordón se centrifuga a veces antes de congelarla para separar los hematíes que son más pesados (*en el fondo*). Las células madre se encuentran en la fracción líquida amarillenta.

del 10 por ciento de las muertes consecutivas a un trasplante de médula ósea: el citomegalovirus (CMV). Más de la mitad de la población adulta de los Estados Unidos es portadora de CMV, virus que continúa viviendo en los leucocitos del huésped después de la infección inicial. Aunque el CMV produce de ordinario una infección vírica inocua en las personas sanas, puede matar a los privados de defensas inmunitarias después de un trasplante de médula ósea. Si bien se determina en los donantes de médula la presencia de CMV, el paciente puede recibir una médula CMV-positiva cuando se trata de la más compatible. Sin embargo, puesto que no llega ni siquiera al 1 por ciento el número de niños que contrae el CMV en el útero materno, la sangre del cordón sería, por ese motivo, harto más fiable.

Inconvenientes

El trasplante de la sangre del cordón no carece de riesgos. Existe la posibilidad de que las células madre del cordón umbilical posea defectos genéticos que induzcan una enfermedad en el organismo receptor. Pensamos, entre otras, en anemias congénitas o inmunodeficiencias que quizá no se manifestaran en el donante en el transcurso de meses o años, tiempo en el que la sangre del cordón podría haberse trasplantado ya a algún receptor.

Los bancos de sangre de cordón umbilical podrían paliar el riesgo sometiendo la sangre a una cuarentena de seis a doce meses y preguntando después a la familia sobre la salud del infante. Sería, pues, necesaria una vinculación identificadora a largo plazo entre el donante y la muestra de sangre, lo que plantea problemas jurídicos y éticos relacionados con la privacidad.

En la actualidad el Centro de Sangre de Nueva York pide a los padres de donantes potenciales que completen un cuestionario detallado en el que se subrayan aspectos de sus historias médicas individuales y familiares, junto a su anamnesis sexual. Si alguna de las respuestas al cuestionario genera reservas médicas, el centro no recoge o conserva la sangre del cordón umbilical. El centro mantiene sólo un nexo de corto plazo con el donante, hasta que terminan los análisis víricos. En ese momento la sangre del cordón se hace anónima.

Otra limitación de la sangre del cordón umbilical es el número escaso de células madre por muestra. Aunque la sangre puede usarse para el trasplante en adultos, los estudios de Pablo Rubinstein han demostrado que, por culpa de esa escasez celular, los adultos y los niños que pesen más de 15 kilos se benefician menos que los pacientes más jóvenes. Se trabaja en métodos que permitan aumentar el número de células madre en las muestras de sangre del cordón usando nutrientes y factores de crecimiento. También se intenta corregir, mediante ingeniería genética, enfermedades genéticas como la inmunodeficiencia combinada grave. En este caso, se recogería la sangre del cordón umbilical del paciente, se insertarían genes normales en las células madre y se reintroducirían las células modificadas en el paciente.

Todo esto abre nuevas perspectivas para la aplicación de la sangre del cordón umbilical. Algún día un recién nacido con un defecto genético de la médula ósea o de la sangre podrá ver que su sangre del cordón umbilical se cultiva en el momento del nacimiento, se repara mediante ingeniería genética y después se la reintroducen, liberándole de los efectos negativos de su herencia genética. O también, ese niño podría curarse con sangre de cordón umbilical obtenida de un banco de donantes. Esas situaciones abandonarán pronto el dominio de la fantasía científica para instalarse sobre el suelo seguro de la ciencia, a medida que los avances de la biotecnología expandan el potencial de la sangre del cordón umbilical para curar enfermedades que hasta la fecha eran letales.

Bibliografía complementaria

ETHICAL ISSUES IN UMBILICAL CORD BLOOD BANKING. J. Sugarman, V. Kaalund, E. Kodish, M. F. Marshall, E. G. Reisner, B. S. Wilfond y P. R. Wolpe en *Journal of the American Medical Association*, vol. 278, n.º 11, págs. 938-943; 17 de septiembre de 1997.

UMBILICAL CORD BLOOD TRANSPLANTATION: PROVIDING A DONOR FOR EVERYONE NEEDING A BONE MARROW TRANSPLANT? Ronald M. Kline y Salvatore J. Bertolone en *Southern Medical Journal*, vol. 91, n.º 9, págs. 821-828; septiembre de 1998.



Inocuidad de los alimentos transgénicos

El mundo parece cada vez más dividido entre partidarios de los alimentos transgénicos y quienes los temen. Afirman los partidarios que los cultivos transgénicos pueden resultar menos lesivos para el ambiente y que los alimentos derivados de tales plantas no entrañan peligro alguno para la salud. Y —añaden— la ingeniería genética, capaz de lograr que las plantas medren en suelos pobres o de que produzcan alimentos más nutritivos, no tardará en ser esencial para alimentar a una población que crece aceleradamente. Oponen los escépticos que los cultivos transgénicos podrían entrañar riesgos sin precedentes para el medio y para la salud. Muchos países europeos han adoptado este punto de vista y están restringiendo el cultivo y la importación de productos agrarios transgénicos. Gran parte del debate se centra en consideraciones acerca de la seguridad. Ahora bien, ¿qué dicen, exactamente, las investigaciones científicas recientes acerca de tales riesgos? Las respuestas se ofrecen en las páginas que siguen.

—La Redacción

Plantas transgénicas y ecosistemas

¿Son las plantas genéticamente modificadas la materialización de un viejo sueño de la humanidad? ¿Resultan dañinas para otros vegetales y animales? La investigación científica busca las respuestas

Kathryn Brown

Hace dos años, en la ciudad escocesa de Edimburgo, unos ecovándalos arrasaron un campo de colza. El año pasado, en Maine, otros talaron más de 3000 álamos de un vivero experimental. En San Diego, unos manifestantes machacaron una plantación de sorgo y rociaron con pintura las paredes de los invernaderos. Todos estos desmanes iban contra cultivos transgénicos. Se equivocaron de plano: las plantas destruidas pertenecían a cultivos tradicionales. En todos los casos, los nuevos bárbaros confundieron plantas ordinarias con variedades transgénicas (TG).

No es difícil comprender por qué. En cierto modo, los cultivos TG, que en la actualidad ocupan casi 45 millones de hectáreas de tierras de labor repartidas por todo el mundo, son indistinguibles de los ordinarios. No es posible ver, catar o tocar un gen inserto en una planta, ni percibir sus efectos en el medio circundante. No es posible saber, a simple vista, si el polen que contiene un gen foráneo puede envenenar mariposas o fecundar plantas a varios kilómetros de distancia. Es precisamente tal invisibilidad lo que preocupa. ¿De qué modo, exactamente, podrán los cultivos transgénicos afectar al entorno y cuándo empezaremos a percatarnos de tales efectos?

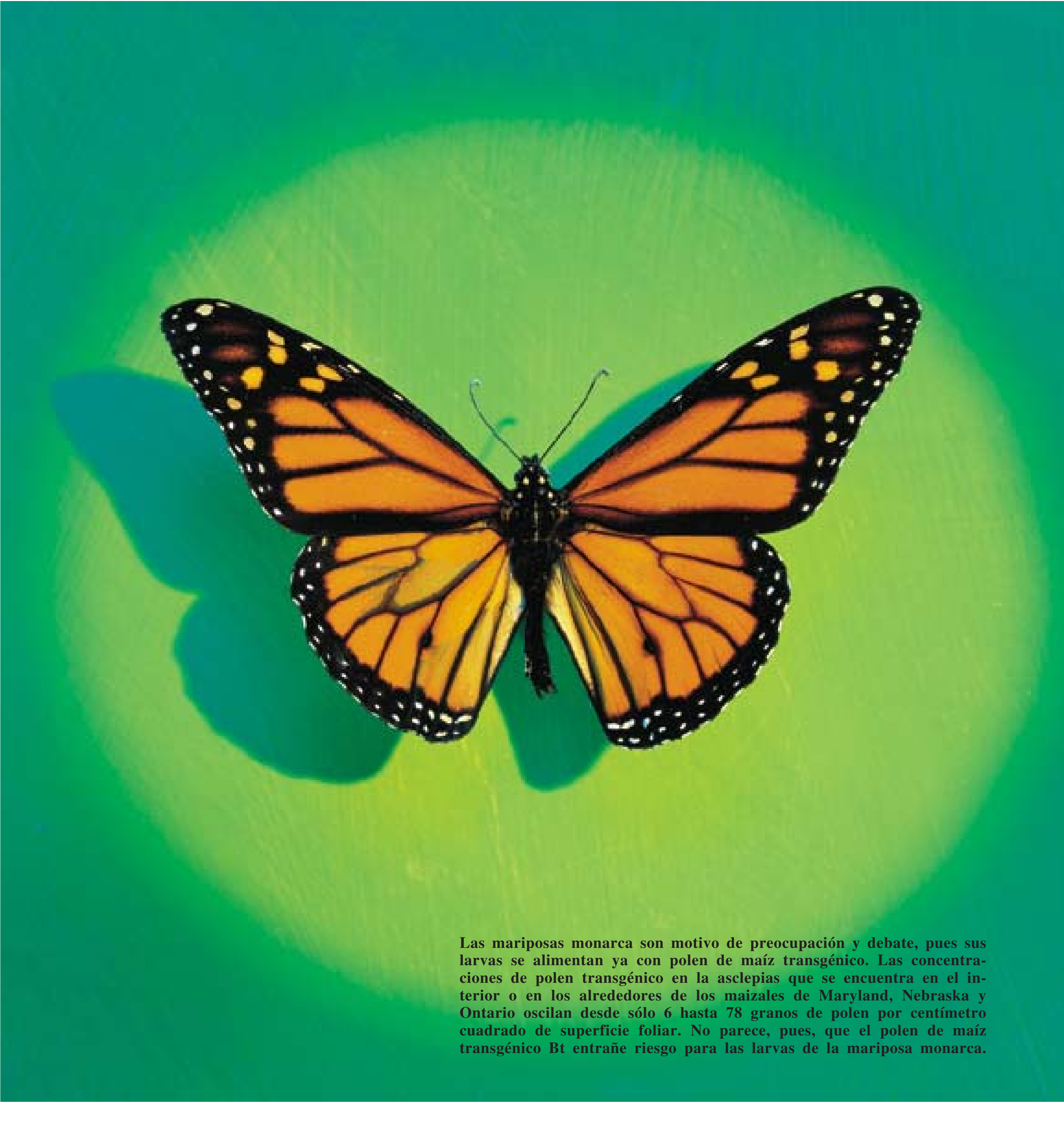
Los defensores de los cultivos transgénicos, cultivos de plantas genéticamente modificadas, afirman que tales plantas serán beneficiosas para el medio, por exigir menores dosis de plaguicidas tóxicos que los cultivos normales. Pero los críticos temen los peligros latentes y se preguntan cuán grandes son en realidad los beneficios. Como reconoce Guenther Stotzky, edafólogo de la Universidad de Nueva York, es mucho lo que no sabemos y es necesario averiguar.

Al tiempo que los cultivos transgénicos se multiplican en el paisaje, numerosos científicos han empezado a desplegarse por campos y sembrados en pos de la información de que carecen. Algunos de sus hallazgos más recientes son tranquilizadores; otros, en cambio, hacen pensar en la necesidad de vigilancia.

¿Menos toxinas en los suelos?

Se estima que todos los años el agro estadounidense recibe unos 440 millones de kilos de plaguicidas, destinados, en su mayor parte, a eliminar insectos, malezas y hongos. Ahora bien, los residuos de los plaguicidas permanecen en las plantas y en el suelo, llegan por lixiviación a las aguas subterráneas y fluyen hasta los cursos fluviales, que sacian a la fauna silvestre. Esta infiltración constante de compuestos químicos viene preocupando desde antiguo.

En torno a 1995, las agroindustrias empezaron a anunciar simientes transgénicas, que prometían reducir la cantidad de plaguicidas tóxicos que tendría que emplear el campesino. En la actualidad, la mayoría de los cultivos transgénicos —centrados principalmente en la soja, maíz, algodón y colza— contienen genes que los capacitan para resistir a las plagas de insectos o para tolerar los herbicidas utilizados contra las malas hierbas. Las variedades resistentes a los insectos generan su propio insecticida, propiedad encaminada a reducir la necesidad de aplicar insectici-



Las mariposas monarca son motivo de preocupación y debate, pues sus larvas se alimentan ya con polen de maíz transgénico. Las concentraciones de polen transgénico en la asclepias que se encuentra en el interior o en los alrededores de los maizales de Maryland, Nebraska y Ontario oscilan desde sólo 6 hasta 78 granos de polen por centímetro cuadrado de superficie foliar. No parece, pues, que el polen de maíz transgénico Bt entrañe riesgo para las larvas de la mariposa monarca.

das químicos. Las variedades con tolerancia a los herbicidas sobreviven a los herbicidas de amplio espectro, y permiten prescindir de otros productos más tóxicos dirigidos contra especies concretas de malas hierbas. Los agricultores prefieren limitar el uso de los plaguicidas más peligrosos; además, los cultivos transgénicos también son atractivos porque simplifican las operaciones (al reducir la frecuencia y la complejidad de las aplicaciones de plaguicidas) y, en algunos casos, porque aumentan el rendimiento de la cosecha.

Ahora bien, la confirmación de efectos beneficiosos sobre el medio ambiente es problemática. Apenas hay artículos revisados por expertos que se hayan ocupado de tales ventajas, las cuales, a su vez, varían quizá según el tipo de planta y el lugar. Se dispone, no obstante, de alguna información. Según el Departamento norteamericano de Agricultura, en los cultivos de plantas que soportan los herbicidas no necesariamente se efectúan menos pasadas vaporizadoras, pero sí se aplican mezclas de productos químicos menos perniciosas. Es típico, por ejemplo, que

en las plantaciones de soja con tolerancia a los herbicidas se eviten los herbicidas más nocivos, utilizando en cambio otros de glifosato, menos tóxicos y de más rápida degradación.

Los cultivos resistentes a los insectos presentan, asimismo, beneficios y perjuicios. Hasta ahora, la resistencia a los insectos la proporciona un gen tomado de *Bacillus thuringiensis* (Bt), una bacteria del suelo. Este gen ordena a las células la síntesis de una proteína que le resulta tóxica a las orugas y escarabajos que devoran los cultivos, pero no causa daño a otros organismos. El gen de la toxina de distintas cepas de *B. thuringiensis* puede afectar a diferentes combinaciones de insectos, por lo que los fabricantes de semillas pueden seleccionar la versión que parezca más idónea para cada cultivo.

Entre todos los cultivos que portan genes Bt, ha sido el algodón el que ha provocado mayor descenso en el uso de plaguicidas. Según la EPA (Oficina de Protección Ambiental estadounidense), a lo largo de 1999 los plantadores de los estados que siembran grandes cantidades de algodón Bt utilizaron para rociar sus cultivos un 21 por ciento menos de insecticida de lo habitual, cifrado entre 7 a 14 veces por temporada. Los plantadores de maíz o patata Bt informan de menor disminución en el uso en plaguicidas, debido sobre todo a que estas plantas requieren menores cantidades de estos productos y a las fluctuaciones en el número de sus plagas.

Más difícil que el cálculo de los beneficios de los cultivos transgénicos parece la definición de los riesgos ambientales que plantean. Hay en marcha numerosas investigaciones sobre las consecuencias de los cultivos Bt y otras plantaciones transgénicas. ¿En qué medida afectan los cultivos Bt a organismos "no diana", es decir, insectos inocuos, aves, gusanos? ¿Polinizarán las plantas transgénicas a otras especies vecinas, difundiendo así sus genes en el medio silvestre, con el peligro de creación de malezas resistentes, cuyo crecimiento no sea posible controlar? ¿Cuánta es la probabilidad de que las características creadas por ingeniería genética pierdan su capacidad de protección de los insectos y de las malezas invasivas, dejando súbitamente vulnerables a plantas transgénicas?

Transgénicos y ecosistemas

En 1998, un estudio suizo desató un generalizado temor a que las plantas Bt pudieran causar inadvertidamente daños colaterales a otros organismos. En este experimento de laboratorio, los índices de mortalidad de las orugas de crisopa verde que habían devorado orugas europeas de pintón (un gorgojo parásito del maíz) alimentadas con maíz Bt fueron más elevados que cuando estas últimas fueron alimentadas con maíz normal. Un año después, el equipo de John Losey, entomólogo de la Universidad de Cornell, informó de que habían alimentado en laboratorio larvas de mariposa monarca con hojas de asclepia ("algodoncillo") espolvoreadas con polen de maíz Bt, y de que también estas larvas murieron.

Todas las miradas se volvieron hacia los folívoros de plantas transgénicas, que liban el polen genéticamente modificado, o que reptan por la superficie de las plantas, organismos todos ellos que desempeñan papeles vitales en el sostenimiento de las poblaciones vegetales. En agosto pasado apareció otro estudio inquietante sobre la mariposa monarca.

Pero el banco de laboratorio no es el campo de siembra, y muchos cuestionan la utilidad de estos experimentos iniciales. Los insectos de laboratorio, se advierte, consumieron dosis mucho más elevadas de toxina Bt de la que podrían ingerir en el mundo exterior, real. En la naturaleza, se ha medido la fracción de la toxina contenida en el polen de parcelas de maíz transgénico que llega, por azar, a alcanzar a las asclepias; se ha determinado también el grado de exposición de las larvas de las mariposas diurnas y nocturnas a esa proteína.

Aunque los datos no se han hecho todavía públicos, la EPA señala que los estudios preliminares de evaluación de las plantas de maíz Bt más comunes (las de Novartis y las de Monsanto) indican que, si bien las larvas de monarca encuentran ya polen de

TRES TEMORES

1 AGRESION INDISCRIMINADA	2 MALEZAS RESISTENTES.	3 FRACASO DE LOS CULTIVOS TRANSGENICOS
1 AGRESION INDISCRIMINADA contra los organismos del entorno a causa de los insecticidas integrados en muchos cultivos transgénicos.	**2 MALEZAS RESISTENTES.** Los genes que confieren a las plantas su resistencia a parásitos o herbicidas, acabarán llegando a la maleza y crearán malas hierbas dotadas de estos caracteres.	**3 FRACASO DE LOS CULTIVOS TRANSGENICOS** porque los insectos parásitos y las malas hierbas se tornarán inmunes a los insecticidas integrados en la planta y a los herbicidas fumigados en sembrados transgénicos.
Según la investigación: Los estudios de laboratorio indican que algunos insectos no diana, como la mariposa monarca, podrían resultar dañados, pero los estudios de campo sugieren que tal riesgo es pequeño.	*Según la investigación:* No se han encontrado tales malas hierbas, salvo casos anecdóticos. Como el polen de las plantas transgénicas puede, a veces, fecundar a especies silvestres de la misma familia, no se deben cultivar las transgénicas cerca de éstas.	*Según la investigación:* No existen fracasos documentados, aunque no se excluye la posibilidad.



maíz Bt en las asclepias, las concentraciones son demasiado pequeñas para ser tóxicas.

¿Qué quiere decir "tóxica"? La EPA estima que los insectos no afrontan perjuicios observables cuando consumen hojas de asclepia cargadas con hasta 150 granos de polen por centímetro cuadrado de superficie foliar. Las concentraciones de polen transgénico en la asclepias que se encuentra en el interior o en los alrededores de los maizales de Maryland, Nebraska y Ontario oscilan desde sólo 6 hasta 78 granos de polen por centímetro cuadrado de superficie foliar. No parece, pues, que el polen de maíz transgénico Bt entrañe riesgo para las larvas de la mariposa monarca.

Se objeta, sin embargo, que no son muchas las pruebas que ponderar. El problema de los efectos no previstos, se aduce, es un puro agujero negro, y los datos de que la EPA dispone en este momento son muy pocos para concluir si el problema de la mariposa monarca lo es de verdad, sobre todo a largo plazo.

El pasado otoño, en un congreso de la EPA dedicado a los cultivos transgénicos, Zigfridas Vaituzis, responsable de investigación de dicha agencia federal, admitió que se carecía de datos a largo plazo sobre la relación entre cultivos Bt y las poblaciones de insectos. Tales estudios exigen más tiempo del transcurrido desde el registro de los cultivos Bt. La EPA continúa recopilando datos sobre cultivos Bt, pero hasta ahora no tiene pruebas de la existencia de efectos adversos que excedan lo razonable sobre los insectos campestres.

Los cultivos transgénicos hacen temer, asimismo, que se produzca un flujo de genes desde la planta original hasta otras que la rodean. El viento o los insectos podrían portar polen de plantas transgénicas hasta hierbajos que estuvieran genéticamente próximos a ellas, y fecundarlos. De ocurrir así, las plantas recién dotadas podrían escapar de su rango ecológico, y trocarse en "supermaleza" provista de resistencia excepcional a la erradicación por depredadores naturales o plaguicidas. Tal flujo de genes es posible, pero se desconocen todavía las consecuencias.

Hasta el momento, ninguna investigación ha hallado pruebas de que los cultivos transgénicos originen supermaleza. Cierto estudio de 10 años de duración, realizado en Inglaterra y publicado en *Nature* en febrero, no descubrió comportamientos anómalos en las proximidades de campos de remolacha, maíz o colza transgénicos. Pero sí se han dado casos anecdóticos preocupantes. En concreto, unos campesinos canadienses han mostrado que la colza transgénica escapó de sus campos de cultivo e invadió trigales como si fuera una mala hierba. Esta colza resistió asimismo a los plaguicidas.

Los estudios que Allison Power, ecólogo de la Universidad de Cornell, ha realizado sobre plantas transgénicas resistentes a los virus aportan nuevas razones para la precaución. Aunque, por ahora, los cultivos virorresistentes ocupan sólo una pequeña cuota del paisaje transgénico, es probable que adquieran mayor prevalencia. Power investiga el flujo de genes en cultivos de cereales —trigo, avena, centeno— do-

ULTIMOS DATOS COSECHADOS

PAISES PRODUCTORES DE COSECHAS TG EN EL AÑO 2000

PAISES INDUSTRIALIZADOS — PAISES EN DESARROLLO

EE.UU. **68%**

ARGENTINA **23%**

CANADA **7%**

CHINA **1%**

OTROS **1%**

EN ORDEN DECRECIENTE:
- SUDAFRICA
- AUSTRALIA
- RUMANIA
- MEXICO
- BULGARIA
- ESPAÑA
- ALEMANIA
- FRANCIA
- URUGUAY

Los primeros cultivos transgénicos comerciales se hicieron en China en 1992, con tabaco, según Clive James. En 1994, un tomate de larga duración, llamado FlavrSavr, fue el primer alimento transgénico en ser cultivado para destino humano en los EE.UU. Desde entonces, la superficie dedicada a cultivos transgénicos se ha disparado. James ha ido siguiendo año tras año las variaciones desde 1996. En el año 2000, afirma, la superficie cultivada seguía en aumento —un 11 por ciento más, equivalente a 4,3 millones de hectáreas—, con lo cual las plantaciones transgénicas cubrían una superficie de más de 44 millones de hectáreas, comparable a la de España peninsular.

El año pasado, sin embargo, el incremento fue menor que en los anteriores, debido, en parte, a que en los EE.UU. se cultivó menos maíz. Entre las causas de tal retracción se cuentan la menor necesidad de control de plagas asociada a ciertas variedades transgénicas y el temor de recesión del mercado de maíz transgénico.

SUPERFICIE MUNDIAL DE CULTIVOS TG

TOTAL **44,2**

PAISES INDUSTRIALIZADOS **33,5**

PAISES EN DESARROLLO **10,7**

MILLONES DE HECTAREAS*

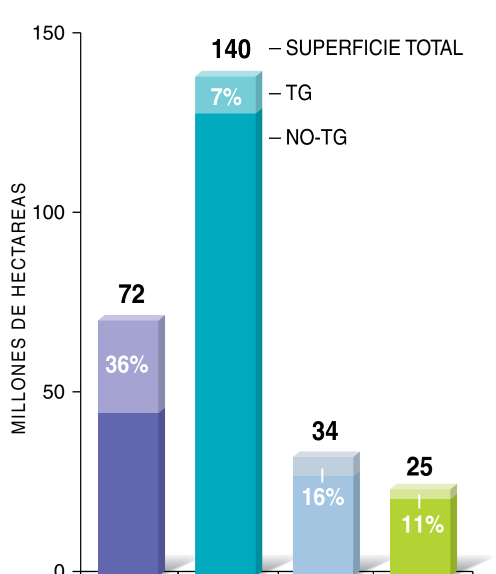
0 — 10 — 20 — 30 — 40 — 50

1995 — 1996 — 1997 — 1998 — 1999 — 2000

*Datos redondeados a la centena de millar de hectáreas más cercana

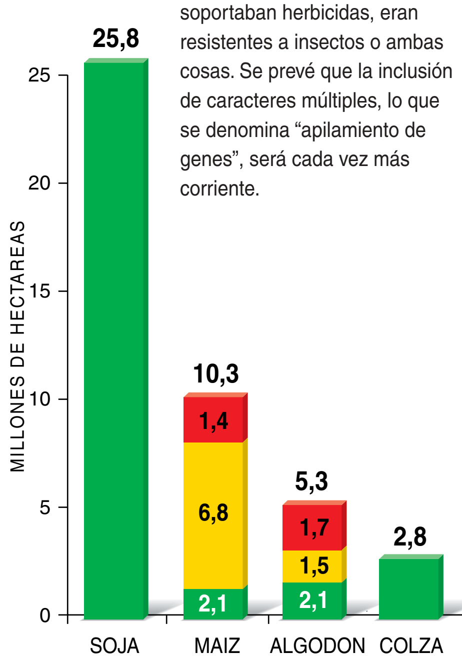
LOS CULTIVOS TRANSGENICOS MAS COMUNES

En el año 2000 fueron sobre todo la soja, el maíz, el algodón y la colza. Abarcaron el 16 por ciento de los 271 millones de hectáreas dedicados a estos cuatro productos.

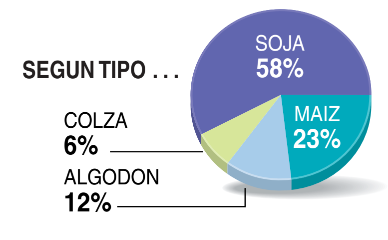


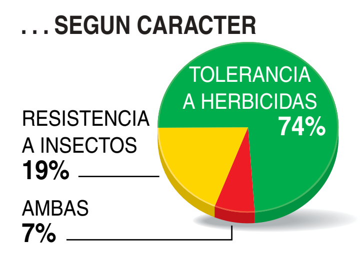
MODIFICACION DE LOS CULTIVOS TRANSGENICOS

Prácticamente toda la soja y la colza transgénicas cultivadas en el año 2000 soportaban los herbicidas; el maíz y el algodón soportaban herbicidas, eran resistentes a insectos o ambas cosas. Se prevé que la inclusión de caracteres múltiples, lo que se denomina "apilamiento de genes", será cada vez más corriente.



PORCENTAJE DE LA SUPERFICIE TG TOTAL





Estos valores pueden no sumar 100% a causa del redondeo.

- TOLERANCIA A HERBICIDAS
- RESISTENCIA A INSECTOS
- AMBAS

FUENTE: Clive James, ISAAA Briefs N.º 21, *Global Status of Commercialized Transgenic Crops: 2000*. www.isaaa.org

tados, mediante ingeniería genética, de genes que confieren a las plantas resistencia al virus amarillo enano del centeno (que causa lesiones a un centenar de especies de gramíneas).

Los ensayos de Power, realizados en laboratorio, indican que la avena silvestre —una variedad emparentada con la doméstica— puede "atrapar" los genes que le confieren resistencia al virus enano amarillo del centeno. Si tal ocurriera en el campo, la avena silvestre podría propagarse sin control por el oeste de los EE.UU., desplazando a las hierbas nativas a una velocidad vertiginosa. Cada cultivo transgénico —advierte Power— conlleva su propia personalidad ambiental y entraña peligros específicos.

En los EE.UU., al menos, la logística del territorio hace bastante improbable que los cultivos con tolerancia a los herbicidas, o los cultivos Bt, lleguen a difundir sus genes biotécnicos hasta las malas hierbas. Ello se debe a que los cultivos transgénicos que se siembran en dicho país carecen de parientes próximos en la región; la mayoría de las plantas sólo pueden polinizar a otras si tanto las receptoras como las donantes comparten número de cromosomas, ciclo biológico, hábitat y otras condiciones. En los EE.UU., entre las excepciones conocidas a la regla de "sin parientes" figura el algodón silvestre que crece en Hawai y en la Florida meridional, el cual, por su extraordinaria semejanza genética con el algodón transgénico, puede aceptar el polen de éste. Para mantener separadas las plantas transgénicas de las silvestres, la EPA ha ordenado a las compañías que no vendan algodón transgénico ni en Florida, ni en Hawai.

Pero tal vez resulte más difícil evitar la aparición de supermalezas fuera de América del Norte, en lugares donde las variedades silvestres sean cosa común. El algodón silvestre, por ejemplo, se extiende más allá de los cayos de Florida, atraviesa el golfo de México y llega a México. En América del Sur, una hierba emparentada con el maíz, el teosinto, contornea los maizales. Ambas plantas aceptarían sin dificultad el polen de una pariente transgénica. De hecho, en muchos países los cultivos transgénicos podrían acabar sembradas cerca de sus variedades ancestrales y compartir con ellas mucho más que el sol. Puesto que casi todas las plantas cultivadas tienen parientes silvestres en algún lugar del mundo, ¿cómo impedir que se efectúen cultivos transgénicos en lugares donde no deberían hacerse?

Transgénicos y evolución

Existe, por último, un riesgo que persigue a los cultivos transgénicos allá donde se hagan: la evolución. Con el tiempo, las plagas de insectos y las malas hierbas pueden adquirir resistencia al ataque con productos químicos estándar. También, con el tiempo, aparecerán por evolución insectos refractarios que parasitarán a las plantas ahora dotadas de resistencia por manipulación genética, y las malas hierbas que festonean los cultivos capaces de soportar los herbicidas se tornarán insensibles a su herbicida óptimo. La agricultura, suele decirse, es una carrera de armamentos, planteada, en términos evolutivos, entre la defensa de las plantas y las plagas. Y los cultivos transgénicos no son sino uno más de los modos en que tratamos de ser más astutos que los parásitos.

Con el fin de que las malas hierbas conserven la vulnerabilidad a los herbicidas, las compañías instan a los agricultores a utilizar sus productos de forma responsable, aplicándolos sólo cuando sea necesario. Para ralentizar en los insectos la adquisición de resistencia a la toxina Bt, la EPA exige que se destine parte de la tierra de labor a cultivos no transgénicos. Tales "refugios" pueden consistir, por ejemplo, en un rincón de un campo, en el exterior de un cultivo Bt o en hileras de plantas normales que interrumpen una parcela Bt. En el interior de estos refugios, los insectos que han adquirido algo de resistencia a la Bt se cruzan con otros que no la poseen, diluyendo el carácter de resistencia. Según Monsanto, transcurridos cinco años de uso comercial de cultivos Bt, todavía no se ha informado de la aparición de insectos resistentes a estos cultivos. Esta compañía sostiene que alrededor del 90 por ciento de los cultivadores de maíz o de algodón cumplen la normativa sobre refugios.

Pero no faltan quienes aduzcan que los refugios no-Bt son demasiado pequeños o están demasiado mal diseñados para que se pueda evitar por mucho tiempo que los insectos adquieran resistencia. En el congreso de la EPA del año pasado, los expertos parecían de acuerdo en que lo procedente era crear refugios mayores y mejores. Pero los algodoneros podrían mostrarse en desacuerdo con refugios grandes. Antes o después, se sigue objetando, acabará perdiéndose la eficacia del gen Bt contra los insectos, para tener que volver a controlarlos por medios químicos. Quienes así opinan se manifiestan en favor de otras opciones agrícolas viables, entre ellas, la cuidadosa rotación de cultivos y los métodos de cultivo orgánico.

Bibliografía complementaria

TRANSGENIC PLANTS AND WORLD AGRICULTURE. Royal Society of London, U.S. National Academy of Sciences, Brazilian Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, Indian National Science Academy, Mexican Academy of Sciences, Third World Academy of Sciences. National Academy Press, julio de 2000.

THE ECOLOGICAL RISKS AND BENEFITS OF GENETICALLY ENGINEERED PLANTS. L. L. Wolfenbarger y P. R. Phifer en *Science*, vol. 290, páginas 2088-2093; 15 de diciembre, 2000.

GENETICALLY MODIFIED PEST-PROTECTED PLANTS: SCIENCE AND REGULATION. National Research Council. National Academy Press, 2000.

TRANSGENIC CROPS IN NATURAL HABITATS. M. J. Crawley y R. S. Chails *et al.*, en *Nature*, vol. 409, páginas 682-683; 8 de febrero, 2001.

ROYAL SOCIETY OF CANADA EXPERT PANEL REPORT ON THE FUTURE OF FOOD BIOTECHNOLOGY. 5 de febrero de 2001.



Productos transgénicos e ingesta

Muchos de los alimentos que ofrecen los supermercados de los países avanzados contienen ingredientes transgénicos. ¿Ha sido demostrada su seguridad para el consumo humano?

Karen Hopkin

LOS DEFENSORES de los alimentos transgénicos esperan que las nuevas cosechas aporten propiedades nutritivas reforzadas y crezcan en suelos pobres. A la larga, piensan, podría ser una solución contra las hambrunas que azotan al Tercer Mundo.

Un bracero dobla el espinazo bajo el sol ardiente de Texas, recogiendo apio, a punto ya para el mercado. Esa noche, una dolorosa erupción de ronchas rojas cubre sus antebrazos. El apio —que pertenece a una variedad nueva y estimada por su resistencia a las enfermedades— ha producido inesperadamente una sustancia química capaz de provocar reacciones cutáneas graves.

Esta hortaliza nociva fue obtenida por medios tradicionales de hibridación. Quienes se oponen a los alimentos transgénicos temen que la inserción en las plantas agrícolas de genes foráneos (tomados, muchas veces, de bacterias) mediante técnicas de ADN recombinante pueda conducir a sorpresas más desagradables todavía. Lo que está en juego reviste suma importancia, pues son muchos los países donde se venden alimentos transgénicos. Según estimaciones, alrededor del 60 por ciento de los alimentos procesados que se venden en los supermercados estadounidenses —desde cereales para el desayuno hasta bebidas refrescantes— contienen algún ingrediente transgénico, en especial, la soja, el maíz o la colza. También algunas hortalizas frescas han sido modificadas genéticamente.

Los detractores exponen varios motivos de preocupación. Es posible que las proteínas producidas por los genes foráneos resulten directamente tóxicas para los humanos. Puede, objetan, que los genes modifiquen el funcionamiento de las plantas de tal modo, que sus componentes resulten menos nutritivos o más proclives a portar concentraciones más elevadas de los tóxicos naturales que muchas plantas contienen en pequeñas cantidades. Y quién sabe si la planta transgénica no va a sintetizar proteínas capaces de provocar reacciones alérgicas.

Las alergias constituían la principal preocupación cuando el maíz StarLink —modificado genéticamente para que produjera una proteína insecticida a partir de la bacteria *Bacillus thuringiensis* (Bt)— hizo acto de presencia en la masa de tacos, en copos de maíz y en otros alimentos. Antes de que tal maíz fuese plantado con fines comerciales, los organismos reguladores estadounidenses observaron indicios de que esta versión concreta de la proteína Bt pudiera ser alergénica; por tal motivo, el StarLink recibió aprobación solamente para cebado de animales, no para productos de abacería.

Los proponentes de alimentos de ingeniería genética ofrecen también sus razones a favor. La cuida-

dosa introducción de genes en una planta ofrece mucho menor riesgo que la introducción simultánea de miles de genes, como suele suceder en los cruzamientos de la mejora vegetal. Los cultivos transgénicos diseñados para reducir las dosis de plaguicidas tóxicos pudieran indirectamente ser benéficos para la salud, al limitar la exposición de los humanos a tales compuestos. De forma más directa, los alimentos objeto de estudio aportarán mayores propiedades nutritivas que sus homólogos normales. Además, los cultivos transgénicos que produzcan nutrientes extra o que crezcan bien en condiciones duras podrían proporcionar una ayuda crítica a las malnutridas gentes del Tercer Mundo.

Los partidarios destacan, asimismo, que todos los cultivos transgénicos se han sometido a ensayos rigurosos en busca de posibles efectos sobre la salud. Aunque no abundan los estudios independientes publicados, los productores han llevado a cabo análisis exhaustivos, pues, por imperativo legal, han de garantizar que los alimentos que venden cumplen la normativa sobre seguridad. Antaño las propias compañías presentaban voluntariamente los resultados de sus ensayos a la autoridad sanitaria competente (la FDA en los Estados Unidos). Sería de desear que ese control previo adquiriera rango legal obligatorio en todos los países.

Los estudios de las agroindustrias empiezan, por lo general, comparando la versión transgénica con las plantas de la misma variedad obtenidas de forma natural, para ver si la adición de un gen foráneo modifica de forma notable la composición química y el valor nutritivo de la planta. Si las únicas diferencias discernibles corresponden a las proteínas cifradas por los genes insertos, se examina la toxicidad de tales proteínas suministrándoselas a animales de prueba en dosis millares de veces superiores a las que los humanos podrían llegar a consumir. Si la modificación genética provoca cambios de mayor cuantía, en los ensayos de toxicidad se suministra el alimento transgénico completo a los animales de laboratorio.

Para evaluar su potencial alérgeno, la composición y estructura de cada nueva proteína producida por la planta transgénica se cotejan con las correspondientes a los más o menos 500 alérgenos conocidos; de presentar una química similar, se abandona el proyecto. Las proteínas son también tratadas con ácidos para remedar el ambiente químico que van a encontrar en el estómago; la mayoría de los alérgenos son muy estables y sobreviven intactos a semejante tratamiento. Por último, los investigadores examinan la fuente original de la proteína. No se permitirá, por ejemplo, la inserción de un gen de cacahuete en una fresa, ya que hay muchas personas alérgicas a las proteínas del cacahuete. Y quien dice proteína de cacahuete puede decir proteínas de arácnidos, moluscos, leche o soja.

Se puede sostener que el sistema de ensayos ha funcionado bien hasta la fecha. Puso de manifiesto que la proteína del maíz StarLink podría ser alérgena (de aquí que sólo fuera aprobada para alimentación animal) y ha llevado a que otros productos —caso de ciertas habas de soja que contenían una proteína procedente de nueces del Brasil— fueran abandonados antes de que tuvieran oportunidad de tomar posiciones en las estanterías de las tiendas de alimentación.

Aun así, las garantías que ofrecen los ensayos de seguridad no son absolutas. Sucede con frecuencia que las plantas transgénicas no llegan a producir la cantidad suficiente de proteína foránea para poderla ensayar en estudios de trofismo. En tal caso, los científicos hacen que sean bacterias las que produzcan tales proteínas. Pero una proteína producida por vegetales, que será la forma que los humanos van a consumir, puede ser ligeramente diferente de la producida por microorganismos, diferencia que podría, en teoría, sesgar la evaluación de seguridad de tal proteína. Y los estudios que utilizan los alimentos transgénicos íntegros están limitados por la cantidad de alimento que cabe introducir en la dieta de un animal sin generar desequilibrios de nutrición que puedan confundir los resultados de los experimentos. Dicho efecto es una de las razones contra un controvertido estudio, realizado en 1999, que afirmaba que el ADN foráneo de ciertas patatas transgénicas alteraba el epitelio intestinal interno de ratas.

Dejando aparte las consideraciones de seguridad aguda, ciertos críticos temen que los alimentos transgénicos causen daños de forma más insidiosa, acelerando la difusión de resistencia a los antibióticos entre bacterias patógenas. Cuando un laboratorio modifica genéticamente a una planta, acopla con el material genético seleccionado un gen "marcador" que revela cuáles son las plantas que han incorporado genes foráneos. Es frecuente que los genes marcadores confieran a sus células resistencia o inmunidad a antibióticos que normalmente las matarían. Cabría la posibilidad de que los genes de inmunidad saltasen desde los alimentos transgénicos a las bacterias del tracto intestinal de los consumidores, agravando así la creciente y preocupante elevación de la resistencia contra los antibióticos entre las bacterias patógenas. La posibilidad de una transferencia tal es muy remota. Con todo, el uso de genes que entrañen resistencia antibiótica terminará por descartarse.

Bibliografía complementaria

ADEQUACY OF METHODS FOR TESTING THE SAFETY OF GENETICALLY MODIFIED FOODS. H. A. Kuiper *et al.*, en *Lancet*, vol. 354, n.º 9187, páginas 1315-1316; 16 de octubre, 1999.

EFFECT OF DIETS CONTAINING GENETICALLY MODIFIED POTATOES EXPRESSING GALANTHUS NIVALIS LECTIN ON RAT SMALL INTESTINE. S. W. A. Ewan y A. Putsztai en *Lancet*, vol. 9187, páginas 1353-1354; 16 octubre, 1999.

¿Son necesarios los

Dos figuras punteras del debate sobre ingeniería

Entrevistas de

Profesor Horsch, usted es vicepresidente de Monsanto, empresa líder en alimentos transgénicos, ¿cómo llegó a interesarse por el tema?

Entré en este campo desde la agronomía. Barruntaba que con las nuevas herramientas que aportaba la biología molecular, podríamos mejorar las plantas. Y se ha hecho realidad. Gracias a esos métodos se producirán más alimentos con menor superficie de cultivo y sin esquilmar los recursos hídricos ni alterar la biodiversidad. La biotecnología resulta indispensable para atender la demanda creciente de alimentos y de otros productos agrarios. La combinación del aumento de la población y de ingresos incrementará la demanda de alimentos en al menos un 50 % dentro de los próximos 25 años.



ROBERT B. HORSCH
recibió en 1998 la Medalla Nacional al Mérito por sus experimentos en la modificación genética de las células vegetales.

¿Pueden Monsanto y otras empresas de bienes transgénicos poner la biotecnología al alcance de los agricultores del Tercer Mundo?

La explotación de los mercados y la aplicación de la técnica para ayudar a los países en desarrollo no son excluyentes. Importa dividir el mercado en tres sectores. Uno es el constituido por el mero comercio. Para nosotros, una compañía que ha de buscar el rendimiento económico, tiene sentido la inversión en desarrollo allí donde podamos vender nuestros productos y obtener beneficios.

En el otro extremo del espectro se encuentra la transferencia no comercial de técnicas, centrada, en buena medida, en la colaboración con el sector público. Tomemos, por ejemplo, nuestra colaboración en la introducción de genes que confieren resistencia contra virus del boniato. No haremos nunca negocio lucrativo con el boniato, por la sencilla razón de que no se trata de un cultivo con economía de mercado. Pero al compartir nuestra propiedad intelectual y nuestros conocimientos técnicos con científicos keniatas, les hemos ayudado a desarrollar boniatos dotados de resistencia a la más grave de las enfermedades del boniato en Africa, capaz de causar la pérdida del 20 al 80 por ciento de la cosecha.

Existe un tercer segmento, el mercado de transición, que a la larga podría ser la vía más vigorosa y bienhechora. Hemos aplicado esta metodología con maíces híbridos de alto rendimiento, obtenidos por mejora tradicional. Podría aplicarse con productos transgénicos. Los pequeños agricultores pueden ver resultados en una parcela de demostración, y pueden, si quieren, ensayarla ellos mismos en una porción de su campo. Tenemos programas de este tipo en México, la India y algunos lugares de Africa. Hacia el tercer o cuarto año, si funciona, la fase de experimentación les habrá proporcionado a los agricultores el dinero suficiente para poder seguir por cuenta propia.

Atendamos a los efectos ambientales de los cultivos transgénicos. ¿Cuáles van a ser los mayores beneficios de esta técnica?

El primer beneficio en que se piensa es la reducción de plaguicidas, recorte importante en el caso del algodón Bt. (Los cultivos Bt han sido modificados genéticamente con el fin de que produzcan una proteína bacteriana que mata a ciertos insectos parásitos.) Según un informe reciente, a lo largo de los cuatro últimos años han dejado de utilizarse alrededor de 1,25 millones de kilos de plaguicidas, y serán muchos más los que dejen de utilizarse en el futuro cuando se puedan cubrir mayores extensiones y más aspectos.

Están, además, las mejoras en rendimiento. El maíz Bt aumenta las cosechas en márgenes apreciables. Aunque depende del año y de la región, estos aumentos pueden oscilar entre el 5 y el 15 por ciento. Habida cuenta de ello, compensa con ventaja el uso de suelo, de agua, de fertilizantes y de todos los plaguicidas que intervienen en el cultivo. Se obtiene un 10 por ciento más de cosecha de maíz con los mismos recursos.

Al obtener más de suelos apropiados, se puede prescindir de otros terrenos que así volverán a ser hábitat de la flora y la fauna silvestres. No podemos seguir expandiendo indefinidamente nuestras antiguas prácticas de uso de productos químicos, desviación de las aguas, roturación de tierras vírgenes o colonización desordenada.

Se ha venido hablando de aumentar el valor nutritivo de los alimentos. Pero ni siquiera el famoso "arroz dorado" acaba de cuajar. ¿Para cuándo los alimentos más nutritivos?

Se observan progresos en la industria, en el mundo académico y organizaciones sin ánimo de lucro. Por ejemplo, en la India estamos colaborando con TERI (Grupo de Investigación en Energía de Tata) en el desarrollo de un producto emparentado con el arroz dorado —el aceite de mostaza amarilla— rico, lo mismo que el arroz amarillo, en beta-caroteno, un precursor de la vitamina A. Ello puede aliviar las deficiencias en vitamina A allí donde el aceite de mostaza constituya un ingrediente básico de la dieta.

Du Pont ha desarrollado un aceite transgénico que contiene mayor cantidad de ácido oleico, un ácido graso. Este producto tiene menores concentraciones de ácidos grasos poli-insaturados y es más estable en el almacenamiento. Se están realizando esfuerzos para modificar otros ácidos con el fin de producir ácidos grasos más saludables para los consumidores. En otros lugares se está investigando también para aumentar el contenido de vitamina D de los aceites de soja.

En Monsanto hemos investigado cierta proteína que es alérgena; tras modificarle ciertos aminoácidos, hemos reducido de forma impresionante la alergenicidad de la proteína. Otros científicos están valiéndose de este y de otros métodos para reducir la naturaleza alérgena de los cacahuetes y el haba de soja.

¿Qué decir de los riesgos?

No creo que a nadie interese —e incluyo a Monsanto— minimizar los hipotéticos riesgos que pudiera entrañar la modificación genética de alimentos. Pero en nuestra actual situación no aprecio riesgos mensurables asociados a los productos transgénicos que estamos vendiendo o desarrollando. Son muchas las organizaciones nacionales e internacionales que han llegado a esta misma conclusión, entre ellas, la Asociación Médica Americana, la Academia Nacional de Ciencias y la Organización Mundial de la Salud.

alimentos transgénicos?

genética defienden posiciones antagónicas

Sasha Nemecek

Doctora Mellon, usted lidera uno de los movimientos opuestos a los alimentos transgénicos, ¿cómo llegó a interesarse por el tema?

Tuve conocimiento de la ingeniería genética estando encargada de un programa sobre sustancias tóxicas en el Instituto de Jurisprudencia Ambiental, hace unos veinte años. En un principio, mi actitud no era muy crítica. Pero cuanto más he ido conociendo sobre estas técnicas, y cuanto más profundas eran las preguntas que hacía sobre ellas, menos dispuesta me encontraba a aceptar sin más las promesas anunciadas en su favor.

Cierto es que los beneficios terapéuticos de los nuevos fármacos compensan con holgura sus riesgos y con frecuencia no existen otras opciones. Pero en la agricultura la situación es diferente. Hasta el momento, al menos, los beneficios asociados a los productos biotécnicos no pasan de modestos. Para afrontar los problemas agrícolas existen, además, otras opciones.

La agricultura no es como la medicina. En los EE.UU., se producen muchos más alimentos de los que se necesitan. Y lo que no pueden producir, lo adquieren de otros países. En consecuencia, en las estanterías de sus mercados existen unos 300.000 productos alimenticios, a los que cada año se suman otros 10.000 más.

Pero muchos científicos y expertos en política aducen que *sí* se necesita la biotecnología para alimentar al mundo, y en especial al subdesarrollado.

La cuestión es importante, por ser tanta la gente —unos 800 millones— que padece subnutrición o hambruna. Ahora bien, ¿es la ingeniería genética la única, o la mejor, solución? Disponemos en la actualidad de suficientes alimentos, pero éstos no llegan a quienes más los necesitan. La mayor parte de los famélicos no pueden, sencillamente, permitirse comprarlos, a pesar de que los precios son los mínimos absolutos de todos los tiempos. ¿Qué tratamiento va a dar la ingeniería genética al problema de la disparidad de rentas? Para ayudar a los hambrientos del mundo a alimentarse por sí mismos, habría que fijarse antes en la política comercial, las infraestructuras y la reforma agraria. Se han dejado de lado las virtudes de la hibridación tradicional, técnica, que después de todo, ha convertido a Estados Unidos en una gran potencia agrícola.

¿Traerán los nuevos métodos una agricultura menos agresiva con el entorno?

Limitándonos al uso de plaguicidas, disponemos ya de algunos datos sobre los impactos producidos por los cultivos de ingeniería genética. El maíz Bt (resistente al pintón o gorgojo) no ha hecho gran cosa para reducir la aplicación de plaguicidas, porque, para controlar esa plaga, la mayor parte de la superficie de cultivo no se trata con plaguicida.



La introducción del algodón Bt, en cambio, sí ha producido un descenso mensurable en el uso de plaguicidas. Eso es bueno para el entorno y un ahorro para los campesinos. Pero tal beneficio durará sólo mientras el carácter Bt conserve su actividad. Dada la forma en que se están implantando los cultivos Bt, se acabará provocando, por evolución, resistencia en las plagas diana, con lo que el algodón Bt dejará de ser útil.

Y existen otros riesgos. Se producirá, seguramente, transferencia de genes, es decir, un flujo de genes desde los cultivos tratados hacia plantas que sean parientes próximos. A través del polen llegarán genes nuevos desde los campos de labor hasta campos cercanos, cultivados o silvestres. La fuga de genes desde cultivos transgénicos resistentes a los herbicidas está ocasionando ya la aparición en Canadá de malas hierbas con rasgos resistentes.

¿Presentan los alimentos transgénicos riesgos para la salud?

Con lo poco que sabemos sobre el problema de la seguridad de los alimentos, yo diría que el motivo principal de preocupación es la alergenicidad. La introducción de nuevas toxinas en los alimentos supone también un riesgo. Las plantas contienen gran número de toxinas; y al manipular los científicos sistemas que no comprenden por completo, uno de los efectos inesperados podría ser la activación de genes correspondientes a toxinas. La hibridación tradicional se atiene a leyes biológicas que gobiernan la conjunción y la separación de los genes. En la transgénesis no estamos obedeciendo esas leyes.

Así pues, ¿considera que los cultivos obtenidos por ingeniería genética no pueden ser extensión de la hibridación tradicional?

No, en modo alguno. Se están creando combinaciones de genes que no se dan en la naturaleza. Desde una posición científica, es indiscutible que se trata de algo fundamentalmente distinto de cuanto se ha hecho hasta ahora. Y eso es antinatural. Ahora, aunque nuevo y antinatural, no se sigue necesariamente que vaya a resultar más peligroso. Pero se trata de una ruptura lo bastante grande con lo anterior como para exigir una medida extra de precaución.

La ciencia nunca puede demostrar al 100 por ciento que una técnica es segura. ¿Que grado de riesgo es aceptable?

Desde luego, yo podría darme por satisfecha si los alimentos transgénicos hubieran sido adecuadamente verificados. Pero no hay nadie que diga: “Vea, tenemos aquí esta gran recopilación de datos experimentales, revisados por expertos, que comparan los alimentos transgénicos y los no transgénicos basándose en cierto número de criterios, que demuestran que estos alimentos no ofrecen riesgo”.

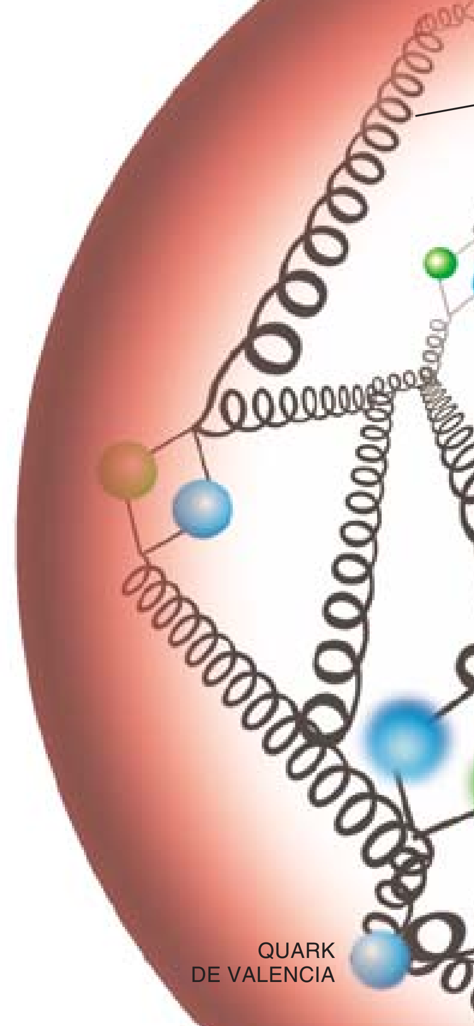
Una vez que haya sido generado ese gran volumen de pruebas, será cuando podremos plantearnos si éstas son suficientes. Y, al final, si todo va bien, llegaremos a un punto en el que diremos: hemos sido precavidos, pero ahora vamos a avanzar; nos preguntaremos entonces si hemos de pescar o seguir preparando cebo. Por ahora no estamos, en modo alguno, cerca de ese punto.

MARGARET MELLON
es graduada en derecho y doctora en biología molecular.

El interior del protón

Tras ocho años de funcionamiento, el acelerador de partículas Hera de Hamburgo —una suerte de "supermicroscopio electrónico"— ha refinado el cuadro global que se tiene de la estructura del protón y de las fuerzas que actúan en la naturaleza

Robert Klanner



Cuatro fuerzas (o interacciones) fundamentales rigen el universo en que vivimos: la fuerza gravitatoria, la electromagnética, la débil y la fuerte. En virtud de la gravitatoria, cae la manzana del árbol y gira la Tierra en torno al Sol. La fuerza electromagnética une los electrones, de carga negativa, a los núcleos atómicos, positivamente cargados; es la interacción que nos suministra energía a través de los enchufes de nuestra casa.

El autor

ROBERT KLANNER es profesor de física experimental en la Universidad de Hamburgo y, desde diciembre de 1999, director de investigación del sincrotrón de electrones alemán (DESY). Ha trabajado en el desarrollo de los detectores de partículas e investigado en la interacción fuerte y en la estructura de los hadrones. Antes de que llegase a Hamburgo en 1984 había pasado por otros grandes aceleradores, como el de Serpukov (Rusia), el Fermilab (Chicago) y el del Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN) de Ginebra.

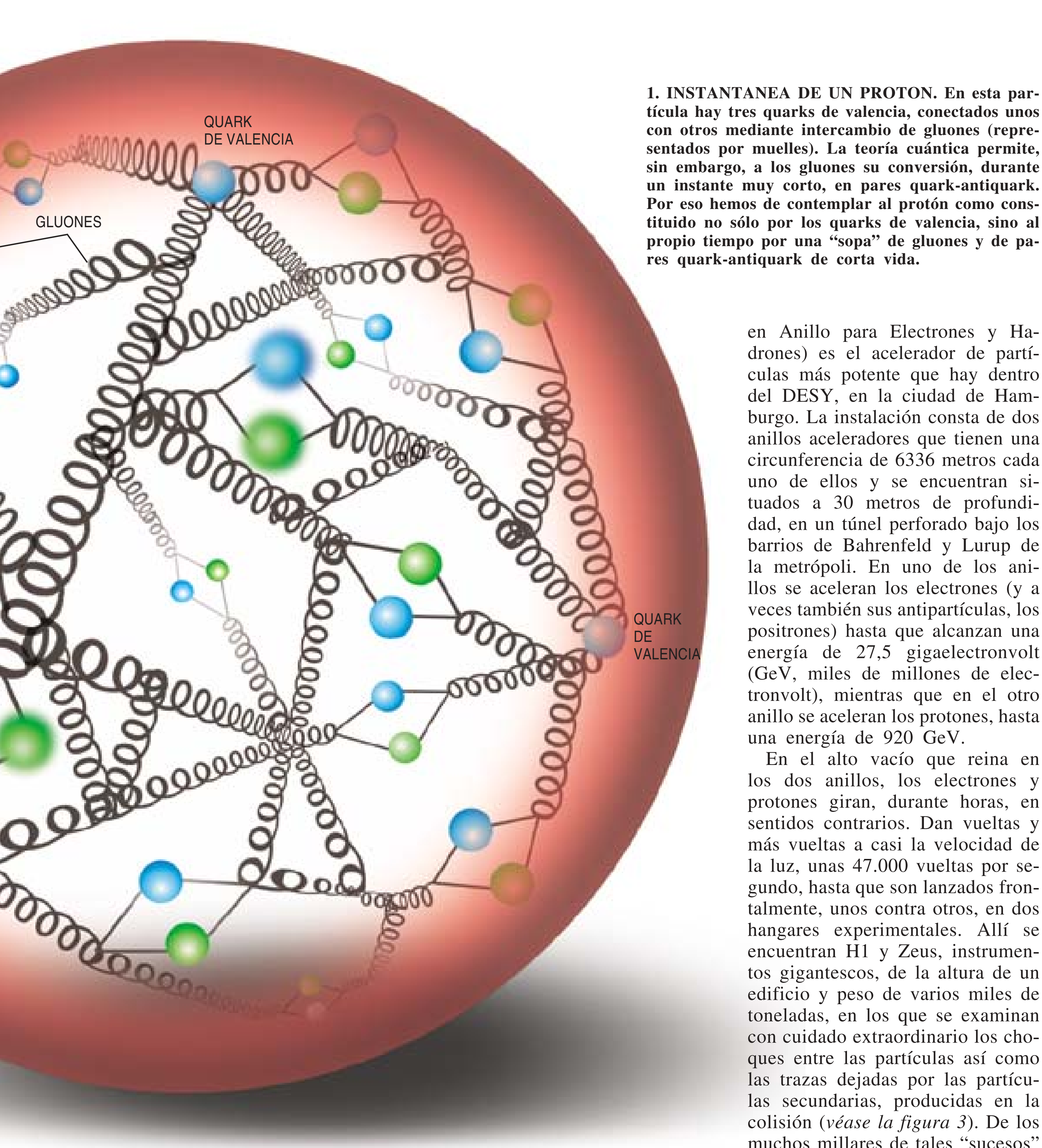
La fuerza débil posibilita la producción de radiación y de energía calorífica en el Sol, mediante un proceso de fusión nuclear, así como la desintegración de los núcleos atómicos. La fuerza fuerte, por fin, mantiene unidas a las piezas más elementales de la materia: junta las partículas puntiformes —los así llamados quarks y gluones— dentro de los protones y neutrones e impide que los protones abandonen los núcleos atómicos a consecuencia de la repulsión mutua que experimentan.

En la vida diaria estamos acostumbrados a la fuerza gravitatoria. Quizá por eso le concedemos especial importancia. Pero en física subatómica, que investiga las interacciones entre partículas, la gravedad no desempeña ningún papel, ya que es muchísimo más débil que las tres fuerzas fundamentales restantes.

La fuerza electromagnética y la débil son las que mejor se conocen. Todos los datos experimentales que se han tomado hallan cabal descripción en el "modelo estándar de la física de partículas", teoría en la que se estructuran las partículas elementales (*véase el recuadro* "El modelo estándar de la física de partículas"). Hasta ahora ha superado con éxito todas las comprobaciones experimentales efectuadas mediante instrumentos de extraordinaria precisión, algunas de las cuales se detallarán a lo largo del artículo. Ello no obstante, los físicos están convencidos de la necesidad de ampliar ese marco teórico, pues deja sin respuesta muchas preguntas fundamentales.

La interacción fuerte plantea numerosas cuestiones cuyas respuestas se nos escapan:

— ¿De qué modo preciso está el protón constituido por quarks y gluones?



1. INSTANTANEA DE UN PROTON. En esta partícula hay tres quarks de valencia, conectados unos con otros mediante intercambio de gluones (representados por muelles). La teoría cuántica permite, sin embargo, a los gluones su conversión, durante un instante muy corto, en pares quark-antiquark. Por eso hemos de contemplar al protón como constituido no sólo por los quarks de valencia, sino al propio tiempo por una "sopa" de gluones y de pares quark-antiquark de corta vida.

— ¿De qué modo depende, la interacción fuerte, de la distancia a que se encuentren el par de partículas interactuantes?

— ¿Por qué han de ir siempre indisolublemente juntos los quarks y los gluones, sin poder nunca observárseles como partículas libres, cosa que no ocurre con protones o neutrones?

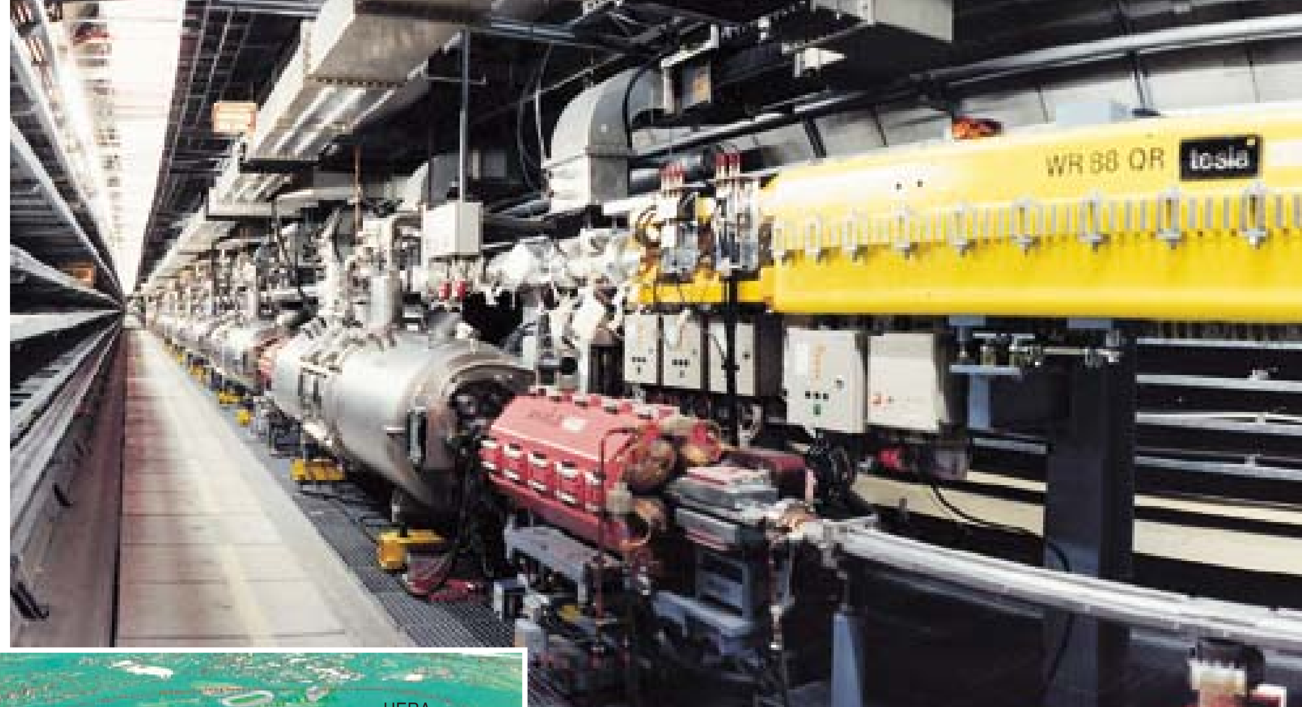
— ¿Acaso tienen las cuatro fuerzas fundamentales un origen común, como suponen la mayoría de físicos, y podremos describirlas en el seno de una teoría unificada?

Las respuestas a estas importantes cuestiones nos las podrán quizá proporcionar los experimentos que se realizan en aceleradores de partículas, como los llevados a cabo en el propio Hera de Hamburgo durante los últimos ocho años.

Hera (acrónimo de Hadron-Elektron-Ring-Anlage, o sea, Instalación en Anillo para Electrones y Hadrones) es el acelerador de partículas más potente que hay dentro del DESY, en la ciudad de Hamburgo. La instalación consta de dos anillos aceleradores que tienen una circunferencia de 6336 metros cada uno de ellos y se encuentran situados a 30 metros de profundidad, en un túnel perforado bajo los barrios de Bahrenfeld y Lurup de la metrópoli. En uno de los anillos se aceleran los electrones (y a veces también sus antipartículas, los positrones) hasta que alcanzan una energía de 27,5 gigaelectronvolt (GeV, miles de millones de electronvolt), mientras que en el otro anillo se aceleran los protones, hasta una energía de 920 GeV.

En el alto vacío que reina en los dos anillos, los electrones y protones giran, durante horas, en sentidos contrarios. Dan vueltas y más vueltas a casi la velocidad de la luz, unas 47.000 vueltas por segundo, hasta que son lanzados frontalmente, unos contra otros, en dos hangares experimentales. Allí se encuentran H1 y Zeus, instrumentos gigantescos, de la altura de un edificio y peso de varios miles de toneladas, en los que se examinan con cuidado extraordinario los choques entre las partículas así como las trazas dejadas por las partículas secundarias, producidas en la colisión (*véase la figura 3*). De los muchos millares de tales "sucesos" que se producen en cada segundo, sólo se guardan para posterior estudio los más interesantes.

En H1 y Zeus, que se hallan en funcionamiento desde 1992, trabajan unos 400 físicos procedentes de 50 institutos y 12 países distintos. Los equipos de investigación analizan cantidades ingentes de datos de muchos billones de bytes con el objetivo de desvelar los secretos del protón y de





2. AL NOROESTE DE HAMBURGO se halla el gran centro de investigación denominado DESY. El túnel por donde discurre bajo tierra el acelerador Hera, de más de 6 kilómetros de longitud, atraviesa barrios residenciales e industriales, así como el frondoso Volkspark de Hamburgo. El complejo del DESY propiamente dicho se halla confinado por el acelerador Petra. La instalación en anillo para hadrones y electrones, Hera, con sus cuatro experimentos —H1, Zeus, Hermes y Hera-B— es la única en el mundo en la que se hacen colisionar protones y electrones a altas energías.

las fuerzas fundamentales de la naturaleza. En la actualidad se están efectuando en Hera labores de reestructuración para multiplicar por cinco su capacidad, utilizar el espín de los electrones con fines experimentales y perfeccionar los detectores. Se prevé que, en el próximo otoño, puedan reanudarse los trabajos experimentales.

Hera es el primer y único acelerador de partículas en el que se provoca el choque de partículas tan distintas como son los electrones y protones. De acuerdo con nuestros conocimientos actuales, los electrones son puntuales y "elementales", es decir, que no están constituidos a su vez por otras partículas menores; sus interacciones se comprenden a la perfección. Se emplean, pues, como sondas para desentrañar la estructura de los protones, partículas mucho más pesadas y de un tamaño de unos 10^{-15} metros, así como la de las interacciones fundamentales. De este modo Hera completa el programa de la física de otros dos importantes aceleradores: el LEP de Ginebra, de electrones y positrones, y el Tevatrón del Fermilab (junto a Chicago), que es de protones-antiprotones [*véase* "El colisionador LEP", por Stephen Myers y Emilio Picasso, en septiembre de 1990, y "El tevatrón", por Leon M. Lederman, en mayo de 1991 de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA].

La energía de que dispone Hera para las colisiones decuplica la de los otros aceleradores similares existentes que buscan también averiguar la estructura del protón mediante el empleo de electrones o muones (un "pariente" del electrón, más pesado). Hera viene a ser, pues, un "supermicroscopio de electrones", que permite echar una ojeada dentro del protón, la más penetrante que se haya podido echar jamás. Se puede descender hasta estructuras que son 2000 veces menores que el propio protón, lo que significa 0,000 000 000 000 000 000 5 metros. A esta escala de magnitudes los físicos pueden incluso estudiar las fuerzas que se ejercen entre electrones y quarks, así como las que tienen lugar entre los componentes del protón, o sea, entre los propios quarks y entre los quarks y los gluones. Esto reporta unas ventajas incomparables, ya que cuanto menores son las distancias a las que es posible investigar el comportamiento de las fuerzas de la naturaleza, tanto más se están acercando los físicos de partículas al conocimiento de la fuerza originaria de toda interacción, al paso que retrocediendo más y más hacia el pasado de la historia del universo.

Partículas sin un tamaño detectable

El modelo estándar compendia todo el conocimiento que se posee en la actualidad sobre la física de partículas. Describe los pilares fundamentales de la materia, así como las reglas que sigue la naturaleza a este nivel. A partir de los quarks y de los leptones —a estos últimos pertenece el protón— se construye toda la materia conocida. Las cuatro interacciones fun-

damentales entre las partículas operan por medio de “mensajeros” denominados partículas de intercambio. Todas estas partículas son “puntuales”, lo que significa que todos los experimentos realizados hasta ahora, incluidos los de la mayor resolución posible, no han sido capaces de medir ningún efecto atribuible al tamaño de las partículas.

La magnitud de cada una de las cuatro fuerzas fundamentales se obtiene a partir de ciertas propiedades de las partículas, que se conocen con el nombre de cargas generalizadas. En el caso de la interacción electromagnética se trata de la carga eléctrica; en el caso de la gravitatoria, de la masa. Para las fuerzas débil y fuerte carecemos de una comparación posible con nuestra experiencia cotidiana. Los conceptos de “carga débil” y de “carga de color” que los físicos han elegido para denominarlas quedan restringidos al dominio de los conceptos abstractos.

Estas “cargas” tan diversas se miden en unidades distintas: la masa, en gramos, y la carga eléctrica, en coulomb. Para comparar las fuerzas directamente entre sí, se recurre a las constantes de acoplo adimensionales, no a las cargas. También en ese caso es válida la idea de que, cuanto mayor es la constante de acoplo, más intensa resulta la radiación correspondiente a las partículas portadoras de la interacción y más intensa la fuerza correspondiente. No se trata, lo veremos en seguida, de “constantes” en el estricto sentido del término, ya que el valor de cada carga depende de la distancia entre las partículas interactuantes.

A la constante de acoplo de la interacción electromagnética se la denomina constante de estructura fina de Sommerfeld. Su valor, determinado experimentalmente, se cifra en torno a 1/137. Por ser mucho menor que 1, podemos resolver las ecuaciones de la teoría cuántica del electromagnetismo (a saber, la electrodinámica cuántica, QED) y efectuar así predicciones muy precisas de las propiedades electromagnéticas de las partículas fundamentales y de sus reacciones. Las predicciones experimentales coinciden hasta la duodécima cifra después de la coma. Por ello, la electrodinámica cuántica constituye ahora, de todas las teorías físicas que existen, la comprobada con mayor exactitud; se esgrime como el modelo a seguir para describir las demás fuerzas entre partículas elementales.

La masa de las partículas mediadoras de las interacciones determina en esencia la dependencia de la fuerza con la distancia: si la masa es nula, como en el caso del fotón y del gravitón —partículas mediadoras correspondientes a la interacción electromagnética y a la fuerza gravitatoria, respectivamente—, entonces el alcance de la fuerza correspondiente es infinito. Por eso mismo no se conocen en nuestra experiencia cotidiana del mundo macroscópico. Los bosones W y Z, que median la fuerza débil, tienen aproximadamente una centésima parte de la masa del protón. En consecuencia, el alcance de la interacción débil se halla limitado a la centésima parte del diámetro del protón, es decir, a unos 2×10^{-18} metros.

La situación sufre un cambio radical en el caso de la interacción fuerte. Sus mediadores, los gluones, carecen de masa; pese a ello, el alcance de la interacción fuerte se reduce a una distancia equivalente al radio del protón (10^{-15} metros). Además, el valor de la constante de acoplo fuerte, para distancias muy inferiores a la correspondiente al radio del protón, es tan pequeño, que podemos emplear una descripción que contempla a las partículas mediadoras individualmente; y se pueden resolver las ecuaciones de la cromodinámica cuántica (QCD) del mismo modo que las de la electrodinámica cuántica. Para distancias superiores, en cambio, la constante de acoplo se hace extraordinariamente grande, mediante la participación en la interacción de los gluones con carga de color. Tan grande, que no resulta posible en absoluto, por ejemplo, extraer uno de los tres quarks que forman el protón, separándolo del resto. En tal situación fallan, estrepitosamente, los métodos de cálculo de la QCD, y hasta ahora no se ha logrado responder de una manera teórica, mínimamente satisfactoria, a las muchas preguntas que se plantean sobre la estructura del protón o sobre las características del confinamiento de los quarks y de los gluones dentro del protón. Precisamente avanzar en esta dirección es la razón principal de los ensayos experimentales que se llevan a cabo en Hera y otros aceleradores.

Cuando en los anillos de Hera un electrón de alta energía choca frontalmente con un protón, le en-



3. QUE OCURRE CUANDO en el acelerador Hera colisionan protones y electrones a muy alta energía lo observan estos gigantescos detectores, de altísima sensibilidad. La imagen nos muestra el detector Zeus en el que, al igual que en el detector H1, quedan marcadas las trazas originadas en la tremenda colisión de partículas.

vía una partícula mediadora de la interacción que tiene lugar, la cual entra en interacción con los constituyentes del protón. Del impulso (el producto de la masa por la velocidad de la partícula) que intercambia la partícula mediadora depende la distancia mínima a la que puede investigarse el comportamiento de la fuerza fuerte. Cuanto mayor es el impulso intercambiado, mayor resulta la definición espacial del microscopio Hera. Las energías de los rayos de electrones y de protones se eligen de suerte tal, que se obtienen intercambios de impulso de 320 GeV/c y una resolución de 5×10^{-19} metros. Con ello la capacidad de resolución del acelerador Hera quintuplica la precisión del alcance de la fuerza débil.

A partir de la energía y del ángulo formado por los electrones después del choque, podemos determinar el impulso de las partículas mediadoras para cada suceso. Ello permite, en Hera, establecer directamente la magnitud de la fuerza en función de la distancia.

Además, a partir de la energía y del impulso de las partículas mediadoras podemos averiguar la porción del impulso del protón que llevaba el quark que ha sufrido el choque. Dada la enorme energía de los rayos de partículas de Hera, resulta incluso posible estudiar quarks que tienen una fracción del impulso del protón de apenas 10^{-5} con una resolución de 5×10^{-16} metros. Antes, ello sólo era posible con quarks portadores de al menos una fracción de 10^{-3} del impulso total. También en este

Protones en el supermicroscopio de electrones

Unificación de las fuerzas débil y electromagnética

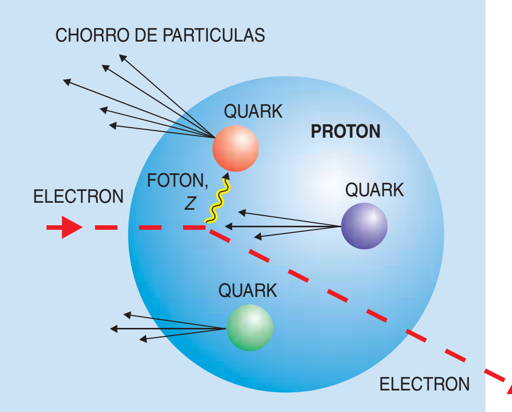
Los investigadores de Hera han confirmado experimentalmente, a través de las colisiones de electrones y protones, que la interacción débil y la electromagnética no son sino manifestaciones de una misma fuerza más general, la interacción electrodébil. A tal fin los físicos comparan la frecuencia medida de dos reacciones de partículas:

La reacción de corriente neutra: "El electrón colisiona con un protón, dando origen a un electrón junto con otras partículas." En una tal reacción de partículas, la interacción del electrón con uno de los quarks del protón se produce mediante intercambio de partículas mediadoras neutras, a saber, las electromagnéticas (fotones) o las correspondientes a la fuerza débil (bosones Z^0). La frecuencia con la que aparece esta reacción es una medida de la intensidad de la fuerza electromagnética y de la fuerza débil.

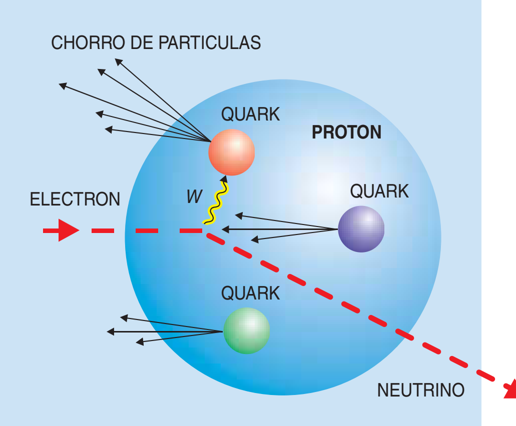
La reacción de corriente cargada: "El electrón colisiona con un protón, dando origen a un neutrino junto con otras partículas." En una tal reacción de partículas, la interacción del electrón con uno de los quarks del protón acontece mediante intercambio de partículas mediadoras cargadas de la interacción débil, a saber, los bosones W^+ o W^-. La frecuencia con la que aparece la reacción es una medida de la intensidad de la fuerza débil.

En ambas reacciones, el quark que ha tomado las partículas mediadoras es momentáneamente expulsado del protón. Tras ello, genera, con un ángulo grande en relación a la dirección de movimiento del protón, un chorro de partículas. Los dos quarks que restan del protón siguen su camino en la dirección original y generan a su vez chorros de partículas, que abandonan el detector sin apenas ser percibidos. Cuando en el momento de la colisión el electrón envía un fotón o un bosón Z (caso de la corriente neutra), el electrón desviado se observa en el detector y puede medirse. Por el contrario, si se intercambia un bosón W cargado (caso de la corriente cargada), el electrón se transforma en un neutrino, que atraviesa el detector sin dejar huella alguna.

A partir de la frecuencia relativa observada de ambas reacciones como función del impulso intercambiado podemos medir directamente la unificación de las dos interacciones en una sola. Cuando el impulso intercambiado es pequeño, es decir, cuando la distancia entre el electrón y el quark del protón, en el momento de la colisión, es grande, la "reacción de corriente neutra" tiene lugar con mucha mayor frecuencia que la "reacción de corriente cargada". En ese caso la interacción electromagnética resulta bastante más fuerte que la interacción débil (*véase la figura 4*). Cuando el intercambio de impulso es muy grande y la distancia en el momento del choque correspondientemente pequeña —menor que el alcance de la interacción débil—, ambas reacciones presentan la misma frecuencia, es decir, ambas interacciones son igualmente fuertes: se unifican en una interacción electrodébil.



La interacción tiene lugar mediada por partículas neutras, a saber, fotones o bosones Z^0 (reacción de corriente neutra)



La interacción tiene lugar mediada por partículas cargadas, a saber, bosones W^+ o W^- (reacción de corriente cargada)

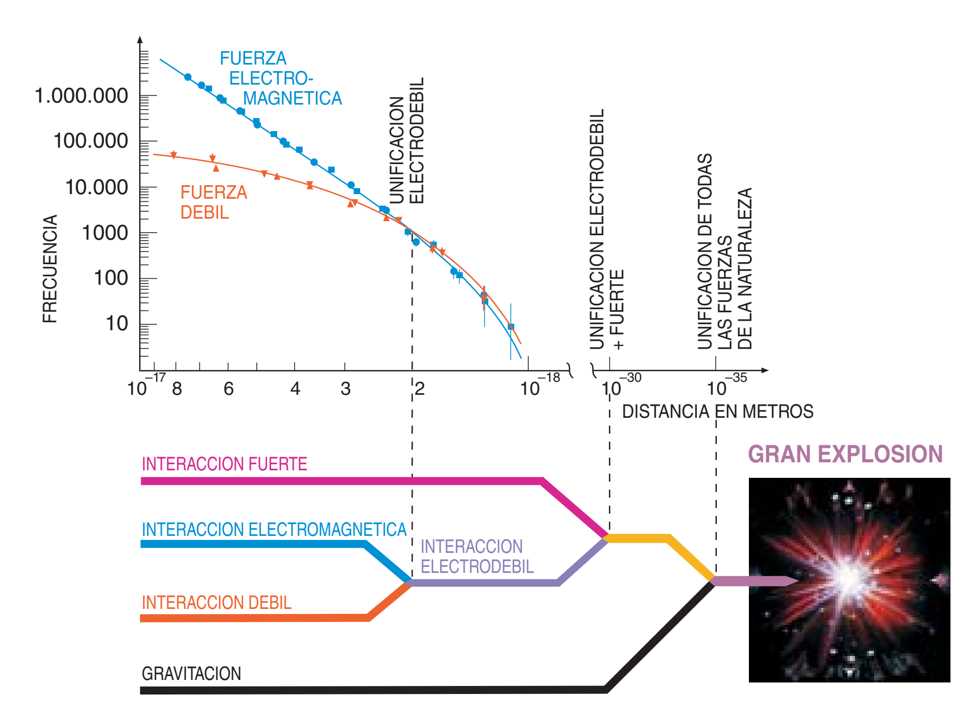
campo Hera ha abierto una ventana a un dominio de la física enteramente nuevo.

La búsqueda de la fuerza originaria

Las determinaciones llevadas a cabo en Hera del valor de las constantes de acoplo correspondientes a las fuerzas electromagnética y débil en función de la distancia aportan una información muy valiosa. Por una parte, ha podido determinarse fuera de toda duda y de una manera directa que, a distancias menores que el alcance de la fuerza débil, ambas fuerzas tienen la misma intensidad; indican, además, que la razón de que a distancias superiores presenten un valor tan distinto se debe a la disparidad de masas de las partículas que median la interacción en cada caso. En otras palabras, las fuerzas débil y electromagnética son simplemente dos expresiones diferentes de una misma fuerza básica (*véase la figura 4*). Esta ratificación experimental de la teoría electrodébil constituye un paso importantísimo hacia la "gran unificación" de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza.

Se dispone ya de una pista sobre cómo dar el siguiente paso en el camino hacia la deseada unificación. Si se extrapolan los valores medidos de las constantes de acoplo de las interacciones electrodébil y fuerte hasta distancias sumamente pequeñas, ambas deberían coincidir a las inimaginables distancias de unos 10^{-29} metros. En cualquier caso, es del todo imposible que los físicos logren jamás realizar experimentos a distancias tan pequeñas: el acelerador de partículas capaz de hacer eso con la técnica actual debería tener las dimensiones de la Vía Láctea.

Hay que acudir, por tanto, a los teóricos. Su modelo para explicarlo todo es la supersimetría. Esta teoría predice nuevas familias de partículas, cuyas huellas deberían descubrirse en la próxima generación de aceleradores de partículas. En ese sentido, las esperanzas están puestas en el gran colisionador de hadrones (el "Large Hadron Collider", LHC), un acelerador



4. LA GRAFICA NOS MUESTRA LA FRECUENCIA de las reacciones de partículas correspondientes a las interacciones electromagnética y débil. Para distancias superiores a la de alcance de la interacción débil (2×10^{-18} metros), la reacción electromagnética ocurre un número de veces sustancialmente superior que la débil. Para distancias inferiores, ambas reacciones acontecen más o menos a la misma frecuencia: ambas fuerzas se han unificado en la fuerza electrodébil. A distancias aún menores, todas las fuerzas existentes en la naturaleza deberían haberse unificado en una fuerza originaria, que es la que habría actuado al principio del universo, justo después de la gran explosión (*debajo*).

de protones que se está construyendo en el CERN ginebrino, y en el Tesla, el proyectado acelerador lineal de Hamburgo para electrones y positrones.

A partir de la extraordinaria coincidencia entre los datos experimentales obtenidos con Hera y las predicciones del modelo estándar, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

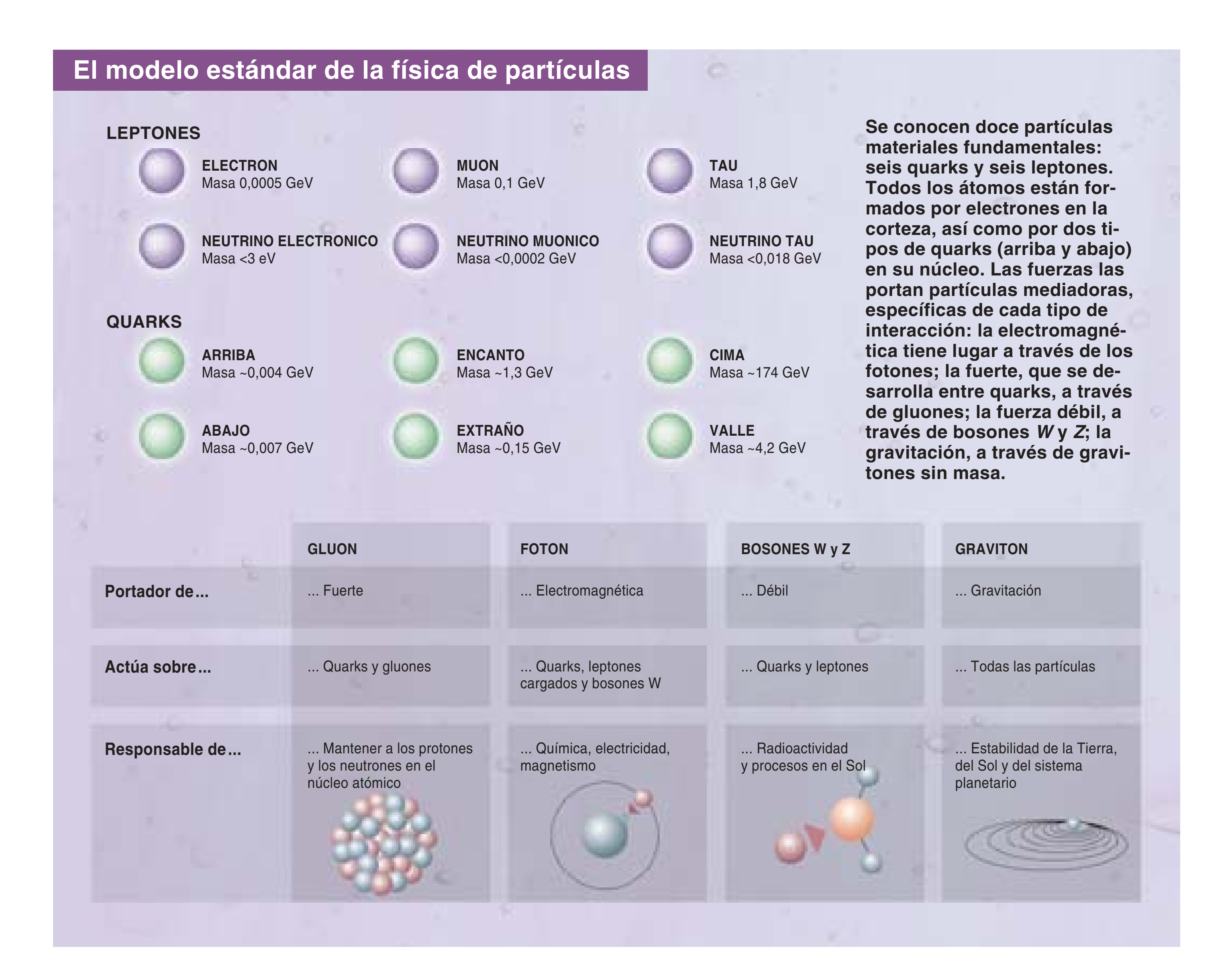
— Los quarks y los electrones son, en todos los aspectos, puntos materiales. Al menos puede afirmarse que su diámetro no es mayor de una milésima parte del diámetro del protón, es decir, no supera los 10^{-18} metros. ¿Nos hallamos, pues, al final de la cadena que nos fue conduciendo hacia partículas materiales cada vez menores, de los cristales al quark y el electrón, pasando por moléculas, átomo, núcleo atómico, protón y neutrón?

— Podemos concluir fuera de toda duda que no existen fuerzas fundamentales cuyo alcance sea superior a la milésima parte del radio del protón.

— Además de las tres dimensiones espaciales en que nos desenvolvemos, no es posible que existan más de tres dimensiones adicionales con una extensión superior a 10^{-18} metros. Tras la reestructuración de Hera, podremos investigar con resolución mejorada si existen dimensiones espaciales aún desconocidas con extensión todavía menor.

Una sopa burbujeante de quarks y gluones

La energía de Hera no es en absoluto suficiente para verificar la unificación de la fuerza electrodébil con la fuerte. Sin embargo, la mirada penetrante que podemos lanzar sobre el protón desvela ya algunas cosas interesantes sobre la naturaleza de la interacción fuerte. Los experimentos H1 y Zeus han medido con notable precisión la magnitud de esta fuerza entre los quarks que constituyen el protón y, con ello, la dependencia espacial de la constante de acoplo fuerte.



Describiremos aquí, de manera breve, uno de los métodos empleados. Junto a los sucesos en que el electrón que ha colisionado y el chorro de partículas, originado en uno de los quarks colisionantes, se alejan del lugar del choque, se ven también sucesos en que aparece un chorro de partículas adicional. Este se ha originado en un gluon, la partícula mediadora de la interacción fuerte, precisamente la que ha intervenido en la interacción electrón-quark. La probabilidad de ocurrencia de un suceso de este tipo en que un gluon origina un chorro adicional de partículas es directamente proporcional al valor de la constante de acoplo fuerte, es decir, a la fuerza entre los quarks. A partir de la cantidad de sucesos observados con un gluon, en función del impulso intercambiado, se puede medir la dependencia con la distancia de la constante de acoplo fuerte. Los resultados corroboran de una manera cuantitativa las predicciones de la electrodinámica cuántica para distancias de entre 10^{-16} y 10^{-18} metros.

Los valores obtenidos mediante otros métodos de medida, así como los resultados experimentales obtenidos en diversas colisiones con distintas partículas, llevados a cabo también en Hera y en otros aceleradores, se muestran coincidentes. Ello nos confirma en la idea de que la QCD describe correctamente la interacción fuerte.

La medición precisa de la estructura del protón —objetivo fundamental de la construcción de Hera— ha sido lograda, a plena satisfacción, por los dos equipos internacionales de investigadores de los experimentos H1 y Zeus. Los errores experimentales están entre el dos y el cinco por ciento, y ello en un rango de valores para los impulsos de las partículas mediadoras que abarcan varios órdenes de magnitud. Estas medidas no tienen rival en el mundo.

De Hera nos llegó una primera sorpresa en el dominio de las pequeñas fracciones de impulso para el quark interaccionante. Se observó que el número medido de quarks y gluones aumentaba drásticamente. Ello quiere decir que, si contemplamos el protón con unas gafas que sólo permiten ver este tipo de constituyentes (los que acarrean como mucho un uno por ciento del impulso total del protón) nos

encontramos entonces, de repente, con una gran cantidad de quarks y gluones. Lo que supone una visión completamente nueva de la vida interna del protón.

Antes de las medidas de Hera se sabía que los quarks del interior del protón emiten gluones y que éstos, a su vez, emiten nuevos gluones o pares quark-antiquark. Sin embargo, los físicos creían que, aparte de los tres quarks de valencia admitidos, sólo unos pocos pares quark-antiquark y unos pocos gluones podían persistir dentro del protón en un momento dado; es decir, pensábase que el protón estaba casi vacío. Con los nuevos datos se nos ofrece un panorama diferente: el protón se asemeja a una sopa espesa y burbujeante de quarks y gluones en la que éstos aparecen y desaparecen constantemente. Esta densidad importante de radiación gluónica representa un estado de la interacción fuerte completamente nuevo y absolutamente desconocido. En nuestra opinión, tal estado es el responsable de que los quarks y los gluones persistan "confinados" en el protón, o sea, de que nadie haya sido capaz de verlos nunca como partículas libres.

Hera nos proporcionó una segunda sorpresa de calado similar. Los físicos experimentales habían esperado que a las altísimas energías del acelerador, con tan gran intercambio de impulso entre las partículas, los protones se habrían troceado cuando menos en cierto número de otras partículas. Sin embargo, en un 15 % de las colisiones, aproximadamente, el protón salía intacto. ¿Cómo es posible que un protón resista un choque de tal energía, en que uno de los quarks recibe un impulso capaz a todas luces de arrancarle del protón? Parecía del todo incomprensible. Pero tiene explicación, que se esconde en una propiedad absolutamente extraordinaria de la interacción fuerte que debería ayudarnos también a entender por qué los quarks y los gluones permanecen "confinados" en el protón, incluso en este caso.

El descubrimiento de estos nuevos sucesos ha conllevado un intenso trabajo interactivo entre físicos de partículas teóricos y experimentales. Se han modificado H1 y Zeus con el fin de poder medir intercambios de impulso aún más pequeños, así como las características del protón resultante. Para empezar, los teóricos se esfuerzan, con ayuda de modelos al efecto, en describir la alta densidad de radiación gluónica que aparece en esos procesos de colisión. Se ha avanzado bastante. Y quizá llegue pronto el momento en que entendamos de qué forma se las arregla esta fuerte radiación gluónica para que los quarks y los gluones no puedan salir nunca como partículas libres tras el proceso de colisión, al paso que el protón permanece intacto.

Tras la huella del misterio de las fuerzas

Recapitulemos. Los experimentos de Hera han visto, con una enorme lupa que usa a los electrones como sonda, la estructura del protón y de las fuerzas fundamentales de la naturaleza, con un detalle nunca logrado hasta el presente. En el dominio alcanzable experimentalmente, las fuerzas débil y electromagnética se comportan de acuerdo con lo predicho por el modelo estándar de la física de partículas: pese a tener un origen común, a grandes distancias ambas constantes de acoplo son muy distintas, diferencias debidas a las masas dispares que hay entre las partículas mediadoras. La teoría de las interacciones fuertes (la cromodinámica cuántica) se ha corroborado con la mayor precisión a distancias muy pequeñas. La estructura del protón se ha mostrado mucho más compleja de lo esperado, ya que para impulsos pequeños la densidad de quarks y gluones es muy alta. Por otro lado, los protones resultantes del proceso de colisión aparecen inmutables en una proporción insospechada. Estas dos últimas observaciones arrojan nueva luz sobre la famosa cuestión fundamental, la que se pregunta por qué están los quarks y los gluones aprisionados en el protón.

Ocurrió ya una vez que la investigación de la radiación procedente de las partículas mediadoras condujo a un descubrimiento que cambió el rumbo de la física de partículas. En 1900 Max Planck se proponía describir por medio de una fórmula la radiación observada correspondiente a un cuerpo negro. Consiguió su empeño, a condición de introducir, como hipótesis, que la energía de la radiación electromagnética podía sólo emitirse a golpes discretos. Esta línea de pensamiento marcó el principio de la mecánica cuántica. Transcurrió más de medio siglo hasta que la electrodinámica cuántica calculara mecanocuánticamente la radiación electromagnética emitida por partículas cargadas. El mismo tipo de formalismo y los mismos métodos de cálculo nos permiten hoy, en el marco de la cromodinámica cuántica, determinar la radiación emitida por los quarks y los gluones a poca distancia. Los resultados de Hera nos podrían ayudar ahora a comprender la radiación QCD correspondiente a distancias mayores y, con ello, a resolver las cuestiones sobre la estructura interna del protón y sobre la posible existencia de quarks libres.

Las preguntas sobre el comportamiento de la interacción fuerte a grandes distancias y sobre qué mantiene unidos a los quarks y a los gluones en el interior del protón no son sino una nueva faceta de la búsqueda tenaz de los constituyentes fundamentales de la materia. El camino que llevó del cristal al interior del átomo y a los quarks y gluones nos conduce hasta el último estadio, de momento, que es el de las partículas elementales, sobre cuya existencia nadie duda, aunque algunas no quieran dejarse ver aisladas.

Bibliografía complementaria

REISE INS INNERSTE DER MATERIE. MIT HERA AN DIE GRENZEN DES WISSENS. Pedro Waloschek. Deutsche Verlagsanstalt, Stuttgart, 1991.

EL MISTERIOSO ESPÍN DE LOS NUCLEONES. Klaus Rith y Andreas Schäfer, en *Investigación y Ciencia*, septiembre 1999.

VORSTOSS IN DEM MIKROKOSMOS. Spektrum der Wissenschaft, Digest 1/2001.

Ciencia y sociedad

Cerámicas

al rojo vivo

La próxima vez que visite un museo que exponga cerámicas o porcelanas busque un color rojo vivo. No lo encontrará. Entre cientos de piezas que abarcan cientos de años de la historia de la humanidad, el rojo vivo brilla por su ausencia. No es una cuestión estética. A los ceramistas del siglo XVII que pintaron la rosa de la ilustración les hubiera encantado disponer del más puro de los rojos. Sin embargo el rojo ha eludido durante siglos a los ceramistas.

En la industria cerámica, como en toda actividad humana, la moda pesa. Pesa tanto, que puede dar lugar incluso a revoluciones técnicas. Como la que llevó del barro cocido a la loza pintada, introducida en Europa por los musulmanes.

Primero fue la loza blanca. Luego reinó la cerámica verde y morada (siglos XIII-XIV) con pigmentos de óxidos de cobre (verde-azulado) y dióxido de manganeso (morado oscuro). Después, hacia mediados del siglo XIV arrasó el azul cobalto, un óxido que ya había cautivado a los árabes en cerámicas procedentes de China y que viajó de nuevo a través de Andalucía y Levante.

La siguiente moda llegó a finales del siglo XIV con revolución técnica incluida. Se trataba de la técnica del reflejo metálico, complejo arte de tres cocciones, que culminaban con la reacción de una mezcla de cinabrio, sulfato de cobre, óxido de hierro, azufre y plata, con vinagre y agua, en una atmósfera reductora de humo. Producía superficies resplandecientes, de lustre metálico, casi como el mismo oro. Pero de rojo, nada.

En el barroco las cerámicas polícromas propiciaron una explosión de color en platos y paredes. La pareja galante de la figura corresponde a esta época, en la que sin embargo las rosas rojas seguían siendo de color naranja.

Más tarde reinó la porcelana, también de origen chino, aunque en este caso importada a través de Europa. Sin embargo el siglo de las luces, con la alquimia en trance de convertirse en química de la mano del francés Antoine de Lavoisier (1743-1794), tampoco descubrió el secreto del rojo.

Y es que dar color a una cerámica no es tarea fácil. Se necesita un pigmento que no se queme o pierda color durante tratamientos en torno a los 1000 ºC. Ningún colorante orgánico pasaría esa prueba. Por ello, los pigmentos cerámicos son inorgánicos, normalmente óxidos, sulfuros o silicatos metálicos. Y no faltan minerales rojos en nuestros suelos, pero sus tonos son quebrados, con tintes oscuros u ocres, poco brillantes.



Ni la dama ni el caballero de esta cerámica parecen muy contentos con el color rojo quebrado de su rosa. Detalle del plafón polícromo "La chocolatada", Barcelona, siglo XVII. (Museo de Cerámica de Barcelona)

Finalmente, un sulfoseleniuro de cadmio (3CdS:2SeCd) vino a cubrir el hueco cromático rojo. ¡Pero no se descubrió hasta 1909! Es decir, unos diez años después del descubrimiento del electrón y de la primera síntesis de la aspirina. En 1909 el cine ya era una industria, los periódicos hablaban de los primeros aviones y Einstein había publicado su teoría restringida de la relatividad.

Además de en cerámica, el rojo de cadmio se ha empleado también como pigmento en todo tipo de pinturas y también en plásticos. Sin embargo, al rojo de cadmio el destino le tenía preparada una jubilación anticipada; no por cuestiones de moda, sino por razón de su apellido. El cadmio es, junto con el plomo, uno de los metales pesados de uso común más tóxicos. Disueltos en vertederos o volatilizados en plantas incineradoras se convierten en un grave problema de contaminación ambiental. Las necesarias normativas ambientales terminaron por limitar drásticamente su uso y empujaron a las industrias cerámica y química a una nueva caza del pigmento rojo.

Pero la solución no llegó de la mano de la industria, sino de un instituto de investigación. Muy recientemente, un grupo alemán dio con la fórmula de un rojo seguro. De hecho, consiguieron toda una serie de pigmentos del amarillo al rojo, con propiedades cromáticas comparables a los de cadmio, con buena estabilidad térmica y sin metales tóxicos. Se trata de una disolución sólida de oxinitruros de tántalo y calcio o lantano, de fórmula general $Ca_{(1-x)} La_x TaO_{(2-x)} N_{(1+x)}$ que comprende compuestos que van del $CaTaO_2N$ (x = 0) de color amarillo al $LaTaON_2$ (x = 1) de color rojo. Las cantidades relativas de O^{2-} y N^{3-}, permiten controlar la diferencia de electronegatividades entre cationes y aniones y, con ello, el tono final del pigmento. En ésta, como en otras muchas ocasiones, la clave del éxito estaba escondida en la tabla periódica de los elementos.

La estructura de estos compuestos es de tipo perovsquita relacio-

nada por tanto con la de los superconductores de alta temperatura. En esta ocasión, sin embargo, la perovsquita no nos brinda cerámicas avanzadas con propiedades avanzadas, sino cerámicas avanzadas con propiedades largamente esperadas.

PEDRO GÓMEZ ROMERO
Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (CSIC)

Acústica del oído

Cóclea y células ciliadas

Escuchar una melodía, reconocer las palabras y cientos de voces diferentes o emocionarse al oír un poema son procesos en los que interviene el sistema auditivo. Todos ellos comienzan con la llegada al oído de ondas sonoras, información que debe traducirse en señales electrofisiológicas para su procesamiento por el sistema nervioso central.

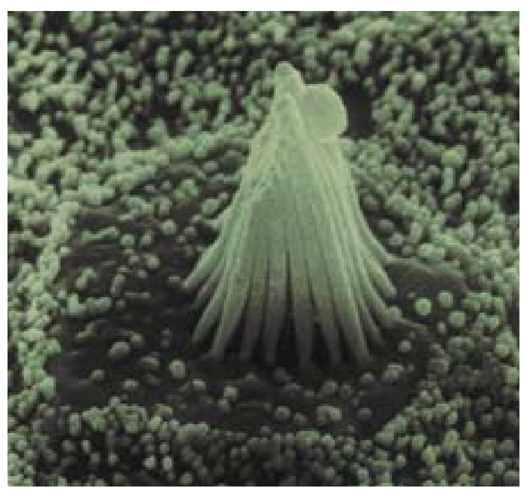
Hasta alcanzar el grado exquisito de sensibilidad del sistema auditivo la evolución ha desarrollado el oído externo, el oído medio y el oído interno, estructuras que modifican las ondas sonoras. En el proceso de transmisión y análisis del sonido, la cóclea desempeña un papel crucial. Se encarga de descomponer el sonido en frecuencias y traducirlo en impulsos nerviosos para su envío al cerebro.

La cóclea es un órgano del oído interno con forma de tubo arrollado en espiral, como un caracol. Su interior está formado por la membrana basilar, que separa la cavidad en dos partes llenas de líquido. Hay en la cóclea humana unas 15.000 células ciliadas, delicadamente organizadas, que dibujan un ramillete de cilios ordenados en forma creciente. Compete a las células ciliadas la traducción de las ondas sonoras en señales nerviosas.

Tales traductores mecano-eléctricos consiguen una finísima sensibilidad en la conversión de vibraciones en señales eléctricas. Cada célula ciliada responde a un intervalo de estímulos alrededor de una determinada frecuencia, su frecuencia característica. En su conjunto, la gama de frecuencias a la que son sensibles estos receptores se extiende desde unas decenas de hertz (Hz) hasta unos 20.000 Hz. Los sonidos naturales, integrados por combinación de muchas frecuencias, se descomponen en cada una de ellas, que a su vez excitan la porción que les corresponde de células ciliadas ubicadas en la membrana basilar.

No obstante la dificultad que entraña el estudio experimental de las células ciliadas en cócleas vivas, se han sucedido diversas teorías a propósito de su funcionamiento desde la aproximación clásica de Hermann von Helmholtz, en la segunda mitad del siglo XIX. Para Helmholtz, la cóclea sería una suerte de piano orgánico en el que una serie de elementos muy precisos se dispondrían a lo largo de la escala de frecuencias y realizarían análisis de Fourier. Tesis confirmada, al poco de su formulación, por von Békésy, quien, experimentando con cócleas muertas, descubrió que la respuesta de la cóclea era lineal en el rango de intensidades sonoras.

Sin embargo, los experimentos ulteriores en cócleas vivas mostraron que la tesis de Helmholtz, aunque atractiva, era incorrecta, ya que el oído no actúa como un sensor pasivo sino activo, que introduce energía en el sistema. Las medidas de velocimetría realizadas en cócleas vivas muestran, en efecto, que la sintonización es sumamente fina y no lineal en sentido estricto: no existe sonido lo suficientemente débil ante el cual se produzca una respuesta lineal de la cóclea.



En la imagen se muestra el ramillete de cilios en reposo que es la estructura que da nombre a las células ciliadas

Si la cóclea funcionara como un mecanismo lineal, un sonido dos veces más intenso estimularía una respuesta dos veces más intensa, mientras que un mecanismo no lineal puede responder con intensidad mayor (o menor, tal en la cóclea). Aunque la respuesta lejos de la resonancia es lineal, en el pico de resonancia crece por debajo del comportamiento lineal, comprimiendo 80 decibelios de intensidad en 20 dB aproximadamente.

Por otro lado, varios experimentos psico-acústicos nos revelan otras propiedades no lineales de la audición. Abundan, pues, las pruebas de que las células del oído que envían al cerebro las ondas sonoras no funcionan con un mecanismo lineal.

Recientemente se ha mostrado que las características vinculadas a la audición se hallan interrelacionadas entre sí, al ser efectos de un mismo mecanismo subyacente. En particular, los elementos que intervienen en la audición se sitúan en una bifurcación de Hopf (una estructura de la teoría de los sistemas dinámicos en la que a medida que un parámetro supera determinado valor crítico se inicia una oscilación; debe su nombre al topólogo polaco Heinz Hopf). De un modo plástico, es como si un técnico estuviera ajustando el volumen en un amplificador al máximo posible antes de que empiece a oscilar. El punto justo donde empieza a oscilar constituye la bifurcación de Hopf.

Con el ajuste a una bifurcación de Hopf se obtienen las características básicas de nuestro sistema auditivo: no linealidades esenciales, compresión del rango dinámico, sintonización muy precisa para señales muy débiles, sintonización más ancha para sonidos intensos, mayor sensibilidad a sonidos débiles que a intensos, y generación de tonos de combina-

ción. Es decir, podemos asociar a una bifurcación de Hopf varios aspectos no lineales de la audición. Este mecanismo presenta, a su vez, entre otras ventajas un mínimo número de elementos activos.

La hipótesis propuesta es compatible con los datos de la fisiología, que respaldan la idea de que las células ciliadas trabajan cerca de una bifurcación de Hopf. Constituye un reto descifrar la relación entre las distintas células que componen la cóclea, una estructura harto compleja. Y pese a la dificultad que entraña relacionar el comportamiento microscópico con el macroscópico, parece plausible que el mecanismo que lleva al oído, considerado en su integridad, cerca de una bifurcación de Hopf es idéntico al mecanismo que conduce a cada célula hacia dicha situación.

VÍCTOR M. EGUÍLUZ
Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados, Palma de Mallorca

Supernovas

y agujeros negros

Hasta hace sólo 30 años los agujeros negros no eran más que un concepto teórico, una solución matemática de las ecuaciones de la teoría de la relatividad general de Einstein. A finales de los años sesenta, los satélites de rayos X empezaron a descubrir fuentes de radiación de alta energía cuyas propiedades temporales y espectrales requerían la presencia de objetos muy compactos.

Hoy en día, la existencia de los agujeros negros es un hecho incuestionable, gracias a la prueba dinámica proporcionada por los sistemas binarios de rayos X. Conocemos una decena larga de sistemas con estrellas compactas más masivas que el límite máximo sostenible por una estrella de neutrones, es decir, el triple de la masa solar [*véase* "Agujeros negros. El sistema V404 Cyg", en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo, 1992].

La formación de un agujero negro constituye un extraño suceso de la naturaleza, que necesita de la inyección de enormes cantidades de energía para conseguir compactar la materia hasta la densidad crítica apropiada. El mecanismo favorito que proporciona dicha energía es la contracción gravitatoria de estrellas muy masivas; éstas, una vez agotadas sus reservas de combustible nuclear, terminan implosionando sobre sí mismas. Se trata del fenómeno conocido por *supernova*. Hasta hace muy poco, no existía ningún dato observacional que apoyara semejante hipótesis sobre la formación de los agujeros negros. Como ejemplo de la devastadora potencia generada por una supernova basta mencionar que nuestra civilización no hubiese podido sobrevivir hace 20.000 años a una explosión cercana (a menos de 33 años luz) porque la tasa de mortalidad, producida por la emisión de rayos cósmicos (0,06 %), habría sobrepasado la tasa de natalidad (0,05 %).

La detección de supernovas se remonta a los albores de la historia. Contamos con 14 registros históricos de explosiones observadas a simple vista en los últimos 2000 años, la postrera en 1604 por Tycho Brahe. La presencia de núcleos de uranio y demás elementos radiactivos en la Tierra constituye una prueba directa de la existencia pasada de supernovas en nuestra galaxia, ya que estos elementos sólo pueden haberse sintetizado en las explosiones que acompañan al "colapso" (contracción gravitatoria) de estrellas masivas.

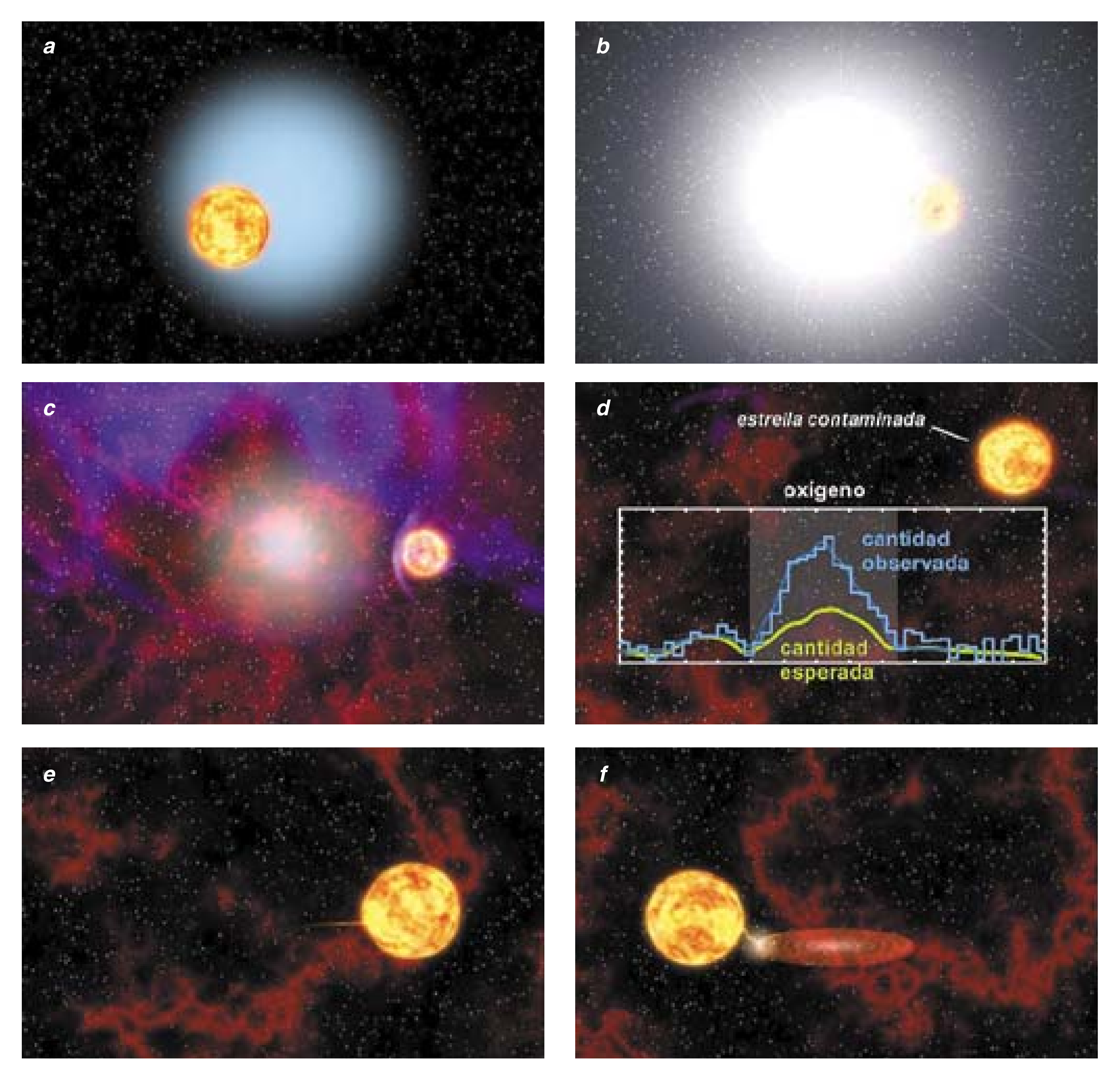
La diversidad de elementos químicos del universo es consecuencia de procesos nucleares que se iniciaron en la gran explosión (Big Bang) y continúan en el interior de las estrellas y el medio interestelar. Todo el hidrógeno, deuterio y parte del helio y litio que observamos "se cocinaron" a 10^9 grados Kelvin durante los tres primeros minutos del universo. El resto de los elementos es el resultado de reacciones nucleares que transcurren en el interior de las estrellas. Tras la gran explosión, la materia difusa (fundamentalmente H y He) se contrajo bajo la acción de la gravedad y dio origen a las primeras protoestrellas.

Los procesos nucleares se disparan cuando la temperatura interna supera los 10 millones de grados. Por ello, las protoestrellas de masa inferior a 10^{28} kg (0,01 de la masa solar) terminan convirtiéndose en enanas marrones [*véase* "Enanas marrones. Teide 1", por Rafael Rebolo en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero, 1996].

Por su parte, las estrellas más masivas invertirán la mayor parte de su vida quemando H y He y transformándolos en elementos más pesados (C, N, O, Si, etcétera), que saldrán expulsados al medio interestelar. De esta forma, las generaciones posteriores de estrellas (nuestro Sol incluido) contendrán tanto el material primigenio de la gran explosión como los productos generados por la combustión del H y He. En definitiva, el número relativo de elementos pesados aumenta con el tiempo, lo mismo en nuestra galaxia que en el resto del universo.

Si la masa de la estrella adquiere cierto tamaño (superior a 8 veces la masa solar), la temperatura interna alcanza un valor críticamente alto (10^9 K) y el He y otros núcleos más estables, como C, O y Si, empiezan a fusionarse para engendrar núcleos de Fe, Ni y otros metales. La estructura del núcleo de la estrella puede compararse a los catafilos de una cebolla; queremos decir que consta de una sucesión de capas en cada una de las cuales prosigue la combustión de un elemento distinto. En la zona externa del núcleo continúa la fusión del hidrógeno, mientras que en la capa más interna (a mayor temperatura) prosigue la fusión del elemento más pesado, el Si. Nos aproximamos al instante en que se produce la formación de la supernova y del objeto compacto (agujero negro o estrella de neutrones).

Cuando la temperatura interna supera los 100 millones de grados, el enfriamiento empieza a estar dominado por la emisión de neutrinos; las zonas internas de la estrella sufrirán entonces una contracción catastrófica. La fase de contracción, o colapso, será catastrófica por dos motivos. En primer lugar, se ha consumido toda la energía nuclear, una vez concluida la nucleosíntesis



Simulación artística de la explosión como supernova de una estrella supermasiva. Sistema binario presupernova (a). *Explosión como supernova de la estrella principal* (b). *Contaminación de la estrella compañera con los restos de la explosión* (c). *Indicación del enriquecimiento en oxígeno de la estrella compañera* (d). *Inicio de la captura de materia estelar por el agujero negro* (e). *Disco de acreción en torno al agujero negro* (f)

del grupo del Fe (Fe, Ni, etcétera). En segundo lugar, el núcleo estelar se vuelve inestable y experimenta una pérdida de presión debido a la "neutronización" (protones y electrones se combinan para formar neutrones).

La posterior contracción produce reacciones de fotodesintegración, que absorben energía (hasta ahora la energía era emitida) y conducen al colapso del núcleo. El proceso de contracción continúa hasta alcanzar densidades nucleares y crear una estrella de neutrones. Si la masa total del material que se contrae es demasiado grande (superior a 3 veces la masa del Sol), entonces se formará un agujero negro. El colapso del núcleo libera una cantidad enorme de energía en un tiempo muy breve, pudiendo invertir la implosión de la estrella y provocar la expulsión de las capas externas. La energía liberada en los primeros instantes del desplome puede llegar a ser de 10^{35} watt, ¡del orden de la luminosidad media de la galaxia!

La explosión de una supernova como la que acabamos de describir disipa, por tanto, grandes cantidades de materia rica en metales (hasta 10 masas solares) en el espacio interestelar. Los detalles físicos de este proceso son muy complejos y aún hoy día seguimos sin comprenderlos demasiado bien. Carecemos, por ejemplo, de un modelo cuantitativo que describa sa-

tisfactoriamente los detalles de la explosión. Tampoco comprendemos por qué el 0,3 % de la energía liberada durante la contracción del núcleo consigue transferirse al manto y producir la explosión de supernova, desconocemos el papel desempeñado por la rotación de la estrella e ignoramos el mecanismo por el que la materia acaba mezclándose en el interior de la supernova. Como ha escrito con un punto de ironía el astrofísico B. Paczynski: "Si no contáramos con observaciones de supernovas sería completamente imposible predecir su existencia a partir de primeros principios, a pesar de los cientos de artículos sapientísimos que se han publicado sobre el tema."

En el año 1994, el satélite *Granat* descubrió una nueva fuente de rayos X en el cielo. Se le impuso el nombre de GRO J1655-40. Los estudios ópticos realizados por el grupo dirigido por J. Orosz demostraron que se trata de un sistema binario, en el que una estrella de tipo solar (tipo espectral F6) orbitaba cada 2,6 días alrededor de un agujero negro de 7 masas solares. Las masas de ambas estrellas se conocen con mucha precisión gracias a trabajos posteriores, en los que se midió el ángulo de inclinación a partir del estudio de eclipses rasantes en la curva de luz.

En mayo de 1998, obtuvimos un espectro de este objeto con el telescopio Keck I, de 10 metros, en Hawai, en colaboración con R. Rebolo, del Instituto de Astrofísica de Canarias, E. Martín y G. Basri, de la Universidad de California. Este espectro se encuentra dominado por la luz de la estrella F6, compañera del agujero negro; un análisis pormenorizado del mismo nos ha permitido descubrir una concentración de oxígeno, azufre, silicio y otros elementos alfa 10 veces superior a la solar.

Los elementos *alfa* (cuyos núcleos son múltiplos de núcleos de He, también llamados *partículas alfa*) no pueden sintetizarse en estrellas poco masivas, como la compañera F6. Se producen normalmente durante la combustión nuclear que tiene lugar en el interior de estrellas masivas y en procesos de nucleosíntesis explosiva en supernovas. La explicación más natural de esta anomalía química supone que estamos observando el residuo "fósil" de la supernova que formó el agujero negro en GRO J1655-40; es decir, los elementos *alfa* fueron expulsados durante la explosión, contaminando la atmósfera de la estrella F6 (las estrellas masivas también producen Fe y otros elementos pesados en las capas más internas de la "estructura de cebolla", pero éstos son absorbidos en el colapso que da origen al agujero negro).

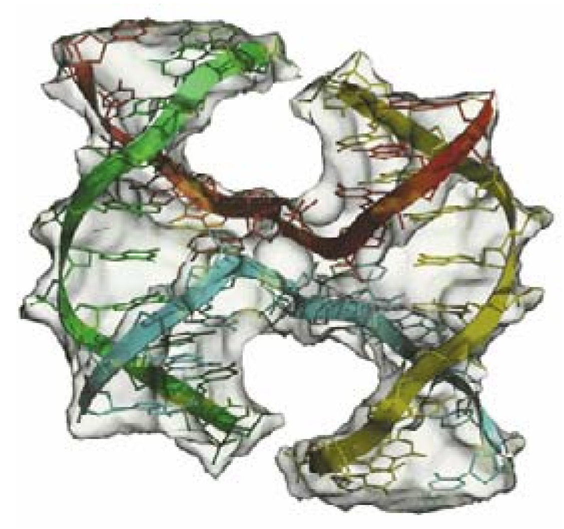
A través del análisis químico del espectro hemos calculado la cantidad total de materia expulsada (al menos 1 masa solar). Combinando esta información con la masa del agujero negro, podemos reconstruir la masa original de la estrella antes de la explosión (entre 10 y 15 veces la masa solar) y poner restricciones importantes a los modelos teóricos de supernovas.

Nuestras observaciones constituyen, además, la primera prueba observacional de que existe una conexión entre agujeros negros y supernovas y suponen el primer paso en la demostración de la teoría de formación y evolución de estos misteriosos objetos.

GARIK ISRAELIAN
y JORGE CASARES
Inst. de Astrofísica de Canarias

Cristalografía de ADN

El cruce Holliday



Estructura tridimensional del cruce o unión de Holliday en el que dos hélices dobles intercambian una de sus cadenas. La estructura se ha determinado a partir de cristales de ADN. (Cortesía de Miguel Ortiz-Lombardía.)

Durante la meiosis o división que dará lugar a la formación de las células sexuales o gametos se produce en los organismos eucariotas un proceso de recombinación homóloga. En virtud del mismo, los cromosomas procedentes de la madre intercambian segmentos con los procedentes del padre, antes de que se constituyan los espermatozoides y los óvulos. Debido a ese proceso de recombinación podemos tener, en un mismo cromosoma, genes heredados de la madre y del padre. La recombinación del ADN, universal (ocurre en todos los seres vivos), resulta imprescindible para crear diversidad, la materia prima de la evolución. La recombinación cumple otras funciones; por citar dos, repara los daños en los cromosomas y posibilita que los virus se integren en el ADN de la célula que invaden.

Para explicar la recombinación homóloga, Robin Holliday propuso en 1964 un modelo de entrecruzamiento del ADN, según el cual las dos hebras dobles se juntan e intercambian una de sus cadenas en un punto. Apelaba, pues, a una estructura intermedia, una molécula que explicaba el intercambio recíproco de ADN entre cromátidas (cruce de Holliday).

De entonces acá numerosos experimentos parecían respaldar la explicación de Holliday. Pero la prueba definitiva tardaba en llegar. Por fin se ha logrado la cristalización de un trozo de ADN con la estructura propuesta. Cristalizada la molécula, puede investigarse su estructura a resolución atómica mediante difracción de rayos X y despejar con ello cualquier ambigüedad sobre su naturaleza. En la pantalla del ordenador, luego de complicados cálculos basados en los datos de la difracción, se representa la estructura molecular en tres dimensiones.

Transcurridos 35 años de la propuesta de Holliday, el autor y otros, del CSIC de Barcelona, cristalizaron un trozo de ADN con el cruce de Holliday y resolvieron su estructura tridimensional. No era eso lo que buscábamos en un principio. Queríamos averiguar qué ocurría en el ADN cuando se producían apareamientos incorrectos entre las dos cadenas, es decir, cuando se cometían errores en la duplicación.

Lo curioso del caso es que muchos otros laboratorios habían intentado cristalizar el cruce de Holliday, sin éxito. La razón era harto sencilla. Ellos no habían dado con la secuencia de ADN adecuada y el grupo español sí. Decía François Jacob que la importancia de un descubrimiento podía medirse por el grado de sorpresa que causa. La nuestra fue mayúscula.

¿Qué aspecto presenta el cruce de Holliday? En la figura ofrecemos una representación del mismo. Llama la atención la escasa distorsión de las dos dobles hélices de ADN unidas, la de la izquierda y la de la derecha. Esa ligera distorsión apreciable con respecto a la estructura típica del ADN de Watson y Crick afecta sólo a los cuatro pares de bases del punto de cruce. Más allá, las hélices son normales y no se tocan. Es como si el ADN estuviera preparado para entrecruzarse sin hacer mucho ruido. Parece lógico, ya que entrecruzarse, recombinarse, es una de sus misiones.

Discreción aparte, el cruce de Holliday puede desplazarse o migrar, como si se tratara del cierre de una cremallera con los dos extremos rotos. El símil no es perfecto, porque en una cremallera sólo hay 2 cadenas y no las 4 de las dos hebras dobles de ADN; además, en la cremallera tampoco se cruzan las cadenas. Si nos fijamos en una de las dobles hélices del ADN, observaremos que, al desplazarse el cruce de Holliday, hay una cadena de la doble hélice vecina que invade y desplaza a una propia. En la doble hebra vecina pasa lo mismo; allí, la cadena invasora sufre el desplazamiento de la otra hebra doble. Si la cadena invasora no es exactamente igual que la desplazada, se producirán algunas zonas con apareamientos incorrectos entre las bases del ADN.

Un cruce de Holliday puede también formar isómeros. Pero no isómeros químicos, fenómeno que implicaría una rotura de los enlaces, sino topológicos, es decir, cambios de conformación. Esto tiene consecuencias genéticas directas, mas, para entenderlo, debemos explicar algunos detalles del cruce de Holliday.

En la figura se aprecia que, de las cuatro cadenas que forman el cruce de Holliday, hay dos continuas, o rectas, y dos de intercambio, o dobladas. Las cadenas continuas son la verde y la amarilla; las de intercambio aparecen en rojo y azul. Se trata, empero, de uno de los dos posibles "isómeros" del cruce. El otro se obtendría doblando las cadenas verde y amarilla y enderezando las cadenas roja y azul. Tendríamos un cruce similar, aunque no equivalente.

¿Qué ocurre al cortarse o resolverse el cruce y separarse las dos dobles hélices de ADN en algún momento después del entrecruzamiento? (Téngase presente que eso es lo que se da en la realidad.) Pues bien, si separamos las dos hebras dobles de ADN del primer "isómero" (el de la figura) nos quedará, a la izquierda, una doble hebra con una cadena verde y la otra mezclada de rojo y azul. En la otra doble hebra de ADN, a la derecha, se formará una cadena amarilla y la otra también mezclada de rojo y azul. En cambio, en el otro "isómero", el resultado de cortar el cruce sería muy distinto: las cadenas mezcladas serían la verde y la amarilla, mientras que la roja y la azul no se mezclarían.

Semejante lío cromático halla su expresión en la realidad. Los cromosomas resultantes, en un caso o en el otro, tendrán combinaciones de genes (de alelos, para ser más precisos) muy diferentes. La estructura de los cristales del cruce de Holliday muestra por qué se formará un "isómero" y no el otro. Aunque cueste creerlo, en el fondo estamos hablando del color de los ojos que tendrán nuestros hijos.

MIQUEL COLL
Instituto de Biología Molecular,
Barcelona

De cerca

Texto: Jens Olesen
Fotografías: J. Olesen y J. Madsen

Tras la pista del néctar rojo



Por lo general, las plantas con flores son polinizadas por animales, sean insectos, aves, reptiles o micromamíferos, a los que atraen produciendo un jugo azucarado e incoloro, el néctar. En 1976 se descubrió en la isla Mauricio una flor de la familia de las campanuláceas, *Nesocodon mauritianus*, cuyo néctar es, sorprendentemente, de color rojo (*a la izquierda, la flecha apunta a una mancha de néctar rojo en la flor vista desde abajo*). Otras dos especies de Mauricio comparten esta singularidad: *Trochetia blackburniana* y *Trochetia boutoniana* (*página de la derecha, arriba; la flecha señala el néctar rojo en el fondo de la corola*). ¿Qué ventaja puede proporcionar a estas plantas el color rojo de su néctar? ¿Tal vez intensifica su atractivo para los animales polinizadores? En una misma zona, diversas especies de plantas compiten para atraer a los mismos polinizadores. Las plantas cuyas flores sean visitadas con mayor frecuencia tienen mayores probabilidades de perpetuarse.

En nuestros días, *Nesocodon mauritianus* es polinizada por el bulbul orfeo (*Pycnonotus jocusus*), pajarillo semejante a un zorzal, importado a la isla a finales del siglo XIX (*abajo, a la izquierda, en el recuadro rojo*) y, en menor medida, por el mirlo local (*Hypsipetes olivaceus*). Las *Trochetia* son polinizadas por dos aves autóctonas (*Zosterops borbonicus* y *Zosterops chloronothos*).

¿Qué especie era la polinizadora de *Nesocodon mauritianus* antes de la llegada a la isla del primer bulbul orfeo? Al parecer, esta planta sólo crece en los abruptos acantilados que rodean una cascada, en el suroeste de la isla (*página de la derecha, abajo*). En esta región, los pájaros polinizadores autóctonos son *Zosterops borbonicus*, *Z. chloronothos*, el mirlo y el foudi de Maurice, que no parecen conceder valor a esta flor. Por otra parte, la humedad imperante en los acantilados que rodean la cascada no es favorable ni para los insectos polinizadores ni para los geckos, pequeños lagartos que polinizan los árboles de los bosques de las llanuras bajas.

Hemos investigado entre los mamíferos. Ha sido atestiguada la presencia en la isla de dos murciélagos panique


TROCHETIA BLACKBURNIANA


TROCHETIA BOUTONIANA

(zorro volador): *Pteropus niger* y *Pteropus subniger*. Aunque el primero, bastante grande, es fundamentalmente frugívoro, no deja de interesarse por las flores: ha sido observado ya sobre flores de hibisco. La segunda especie se extinguió hace ya un centenar de años. La forma de sus dientes y la de su cabeza, amén de su tamaño, le permitían polinizar flores de néctar rojo.

Es posible que *Nesocodon mauritianus* nunca haya tenido un polinizador específico en la isla Mauricio. Los granos de alguna de sus antepasadas pudieron llegar de la isla de la Reunión, llevadas por alguno de los frecuentes ciclones que recorren la región. La isla de la Reunión abriga, en efecto, un género cercano, *Heterochaenia*, representado por tres especies aún vivas. La flor de *Heterochaenia borbonica* se parece mucho a la de *Nesocodon mauritianus*, y una flora de 1887 describe “cinco manchas violáceas” en la flor de *Heterochaenia ensifolia*. ¿Sería posible que su néctar tuviera tal coloración?



Radiación de fondo y modelos cosmológicos

Nuevos detectores a bordo de sondas espaciales medirán con suma precisión las fluctuaciones de la radiación de fondo. Dichas observaciones serán determinantes en la obtención de un buen modelo cosmológico

Alejandro Gangui

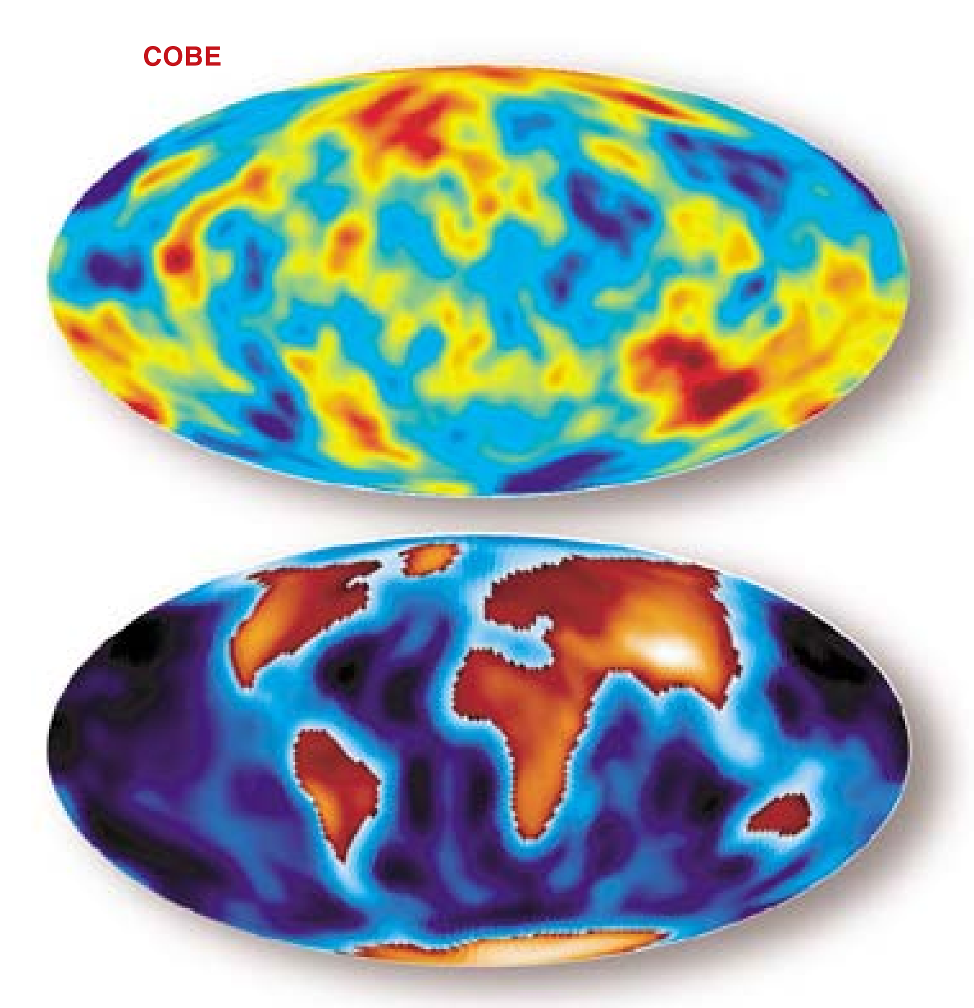
La radiación cósmica del fondo de microondas, vestigio de la gran explosión inicial, es un frío baño de radiación en la región de microondas del espectro de luz que inunda el universo.

Con una temperatura de unos pocos grados Celsius por encima del cero absoluto, la radiación presenta dos propiedades extraordinarias: una isotropía casi perfecta, en cuya virtud la intensidad de la radiación es la misma en cualquier dirección del firmamento, y su espectro, cuya descomposición en frecuencias obedece a la ley de cuerpo negro con asombrosa exactitud.

Ese tipo de radiación sólo puede resultar de un estado de equilibrio térmico entre los constituyentes del universo, en una fase temprana densa, energética y caliente. Pero los fotones fósiles residuales que la componen no provienen directamente de la gran explosión. En el universo temprano la materia se hallaba ionizada y constaba de núcleos de hidrógeno, deuterio, helio y litio, elementos ligeros. Los fotones primordiales sufrieron continuas colisiones contra los electrones libres, convirtiendo el espacio en un medio opaco a la radiación.

Con la expansión, las colisiones se hicieron menos frecuentes y bajó la temperatura ambiente. Los fotones vieron su longitud de onda estirarse y su energía, disminuir. En ese período, mermó el número de los fotones más energéticos hasta resultar insuficientes para destruir la cifra creciente de partículas neutras (hidrógeno, principalmente) que comenzaban a combinarse.

Lo que antes fuera un estado de equilibrio térmico total, se hizo parcial. La radiación no pudo ya mantener ionizada la materia. A una temperatura de unos pocos miles de grados, se desacoplaron materia y radiación. Desde ese momento, y suponiendo que el universo no se reionizó más tarde, materia y radiación evolucionaron por separado. Pero las continuas interacciones determinaron que los fotones olvidaran la información que llevaban impresa; de-



bido a ello, nos quedará por siempre vedado el acceso directo, al menos a través de la radiación electromagnética, a los fenómenos físicos de épocas precedentes. La recombinación de los elementos ligeros se eleva como una "barrera" imposible de sortear cuando intentamos mirar atrás, hacia el momento de la gran explosión.

La radiación cósmica del fondo de microondas (RFM) permite conocer la situación del universo en el momento del desacople entre materia y radiación. Gracias a ella podemos abordar el estudio del tipo y la intensidad de las perturbaciones cosmológicas germinales en el plasma primordial, nubes de gas de materia que pronto se condensaron bajo la atracción gravitatoria y formaron las galaxias.

En 1964, Arno Penzias y Robert Wilson no lograban desembarazarse de un persistente ruido de fondo de una antena de los laboratorios Bell, en Holmdel, planeada para medir ondas de radio procedentes de un satélite de comunicaciones. Aconsejados por el grupo de Robert Dicke, la interpretación de este ruido molesto terminó por hacerlos acreedores del premio Nobel de física en 1978, y, a la antena, del título de monumento histórico el 20 de diciembre de 1989.

Distintos grupos se aprestaron entonces a la tarea de cartografiar la RFM. Para estudiar la formación de estructuras astrofísicas, importa conocer las variaciones espaciales de la intensidad o temperatura efectiva de la RFM. En 1992, el *Explorador del Fondo Cósmico* (COBE) revelaba la presencia de "rizos" primordiales en la suave "cabellera" de la radiación cósmica del fondo de microondas.

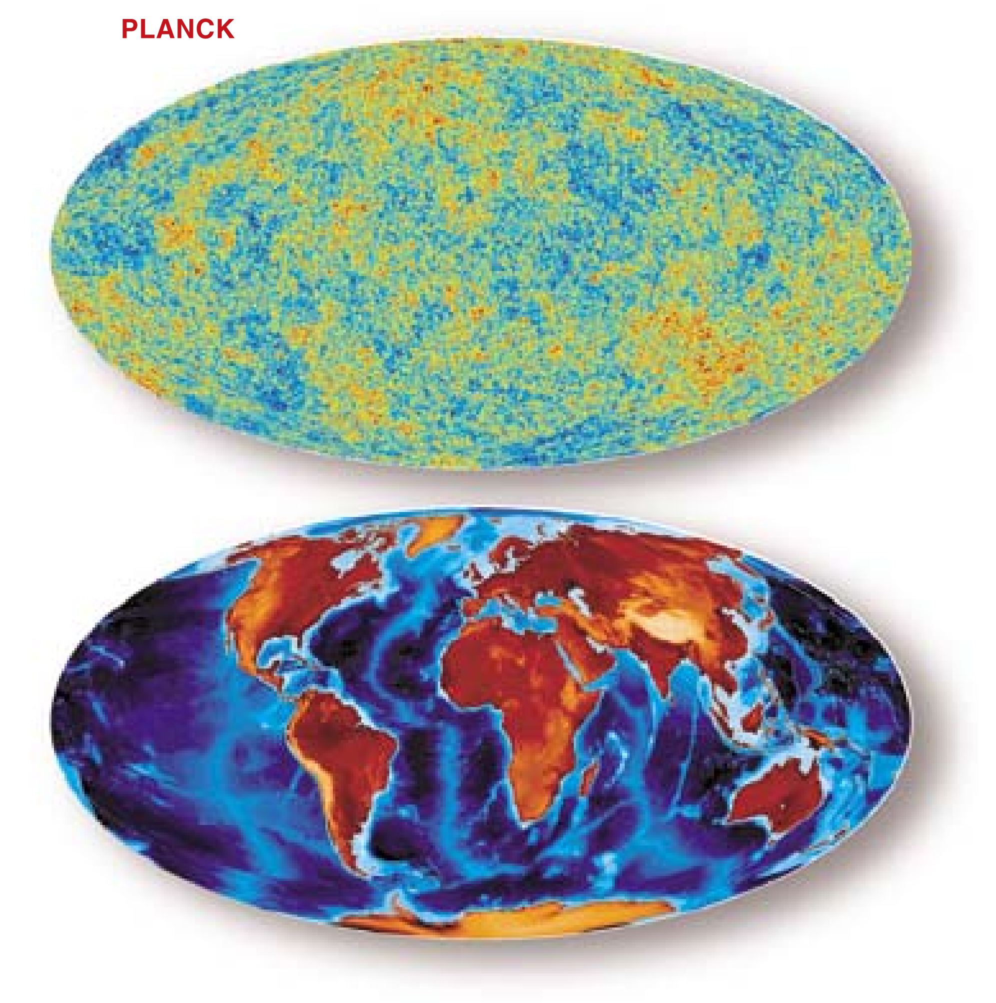
La detección de anisotropías, a un nivel de 30 microkelvin de temperatura, impresas sobre un espectro térmico de cuerpo negro a 2,725 K revolucionó la cosmología y ofreció una herramienta poderosa para enjuiciar los modelos esbozados. Las mediciones del COBE fijan la amplitud y forma del espectro de fluctuaciones a escalas del horizonte cosmológico actual (unos 10.000 megaparsecs). Los detectores a bordo de la *Sonda de Anisotropías de Microondas* (MAP) de la NASA, a lanzarse el 30 de este mes de junio, y de su análoga europea *Planck* refinarán las mediciones. La temperatura actual de la radiación cósmica del fondo de microondas medida por el COBE es $T_0 = 2{,}725 \pm 0{,}002$ K. Cualquier desviación de su espectro con respecto a la radiación de cuerpo negro no excede las 50 partes por millón.

Pero la RFM no es exactamente la misma a lo largo de todo el cielo. Presenta una importante variación espacial dipolar en su temperatura. Esto es, en una dirección cualquiera la temperatura es proporcional al coseno del ángulo formado entre esta dirección y la dirección del movimiento. La diferencia de temperatura sería positiva, más caliente, en la dirección del movimiento y negativa, más fría, en la dirección opuesta.

El tamaño típico de las fluctuaciones a una escala angular determinada está dado por los coeficientes C_ℓ. Así se llaman uno de

El autor

ALEJANDRO GANGUI es miembro del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina. Su interés se centra en la radiación del fondo de microondas y en los aspectos observacionales de los defectos topológicos cósmicos. Es además investigador visitante en el Observatorio de París.



1. LA TIERRA VISTA por el COBE y por el *Planck*. Las simulaciones del cielo de microondas muestran las fluctuaciones en la temperatura de la radiación de fondo en decenas de microkelvin. Ambas simulaciones corresponden a la misma realización de un modelo cosmológico estándar de materia obscura fría, sin curvatura espacial y con fluctuaciones primordiales adiabáticas (que conservan el número de fotones por barión). La resolución del Radiómetro Diferencial de Microondas de COBE (*figuras de la izquierda*) es de unos 10 grados. Las figuras de la derecha corresponden a *Planck*, de 5 minutos de arco de resolución angular. (Cortesía de E. Hivon y K. Górski.)

los observables más importantes a emplear cuando se trata de comparar predicciones teóricas contra los datos de la observación. Por ciertos procesos matemáticos sabemos que las diferencias en la temperatura entre direcciones del cielo separadas por un ángulo θ están relacionadas con cierto parámetro ℓ. A medida que ℓ aumenta iremos considerando rasgos particulares del espectro de fluctuaciones a escalas cosmológicas características cada vez menores. Por ejemplo, en un universo *plano*, sin curvatura espacial, el tamaño del horizonte a la época de la recombinación es del orden de 200 megaparsecs, lo que corresponde a algo menos de un grado de arco cuando lo proyectamos sobre el cielo hoy.

Antes de la recombinación, la densidad de electrones libres era tal, que los fotones no lograban propagarse sin colisionar constantemente contra éstos; el camino libre medio de la radiación era cortísimo. Materia ionizada, electrones y radiación formaban un único fluido, con la inercia provista por los bariones (protones y neutrones) y la presión de radiación de los fotones. Este plasma mixto tendía a condensarse bajo la atracción gravitatoria, pero la presión restauradora de radiación equilibraba esa tendencia. No debe, pues, extrañarnos que aparecieran oscilaciones acústicas impulsadas por la gravedad, tanto en la densidad del fluido como en su velocidad local.

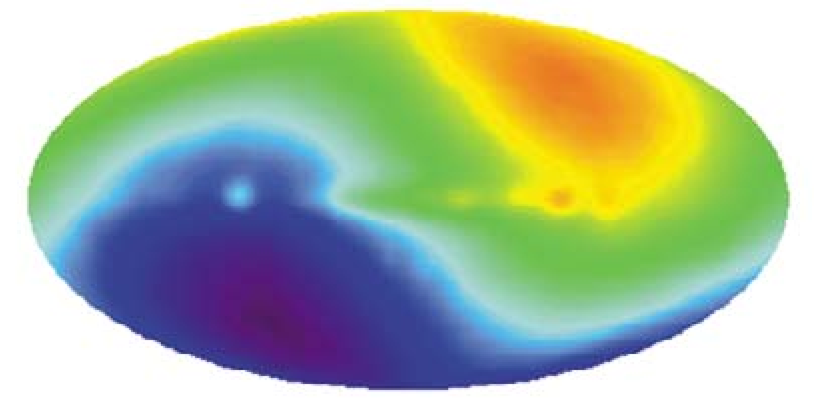
El primer pico acústico nos revela el tamaño del horizonte sonoro en el momento del desacople entre materia y radiación. Su posición fija el ángulo que el horizonte acústico de la recombinación subtiende hoy en el cielo. Un ángulo mucho menor que un grado implicaría que la densidad de materia-energía total del universo sería inferior a la densidad crítica necesaria para que sea euclídeo (o plano). El universo contendría hipersecciones espaciales hiperbólicas de extensión infinita y curvatura negativa (universo abierto); en modelos simples (sin constante cosmológica Λ) la cantidad de masa gravitante sería pequeña y el universo se expandiría indefinidamente. A la inversa, en un universo de extensión finita y curvatura positiva (universo cerrado) la cantidad de materia sería suficiente y permitiría que los rayos de luz que nos llegaran convergieran, en cuyo caso el horizonte acústico de la recombinación subtendería un ángulo mayor al grado de arco.

A escalas angulares muy grandes, la física que describe la generación de fluctuaciones térmicas es bastante sencilla. Puesto que las escalas involucradas son mucho mayores que el horizonte acústico durante la última dispersión de fotones contra electrones libres, el análisis no requiere la microfísica de la recombinación ni parámetros cosmológicos todavía harto imprecisos, como son el contenido exacto en bariones o en materia obscura. Pero estas anisotropías sí dependen de las contribuciones relativas de las perturbaciones en la densidad de energía (perturbaciones escalares) y en ondas gravitatorias (modos tensoriales, el análogo gravitatorio de las ondulaciones en un estanque), así como también de la forma (índice espectral) de dichas perturbaciones primordiales.

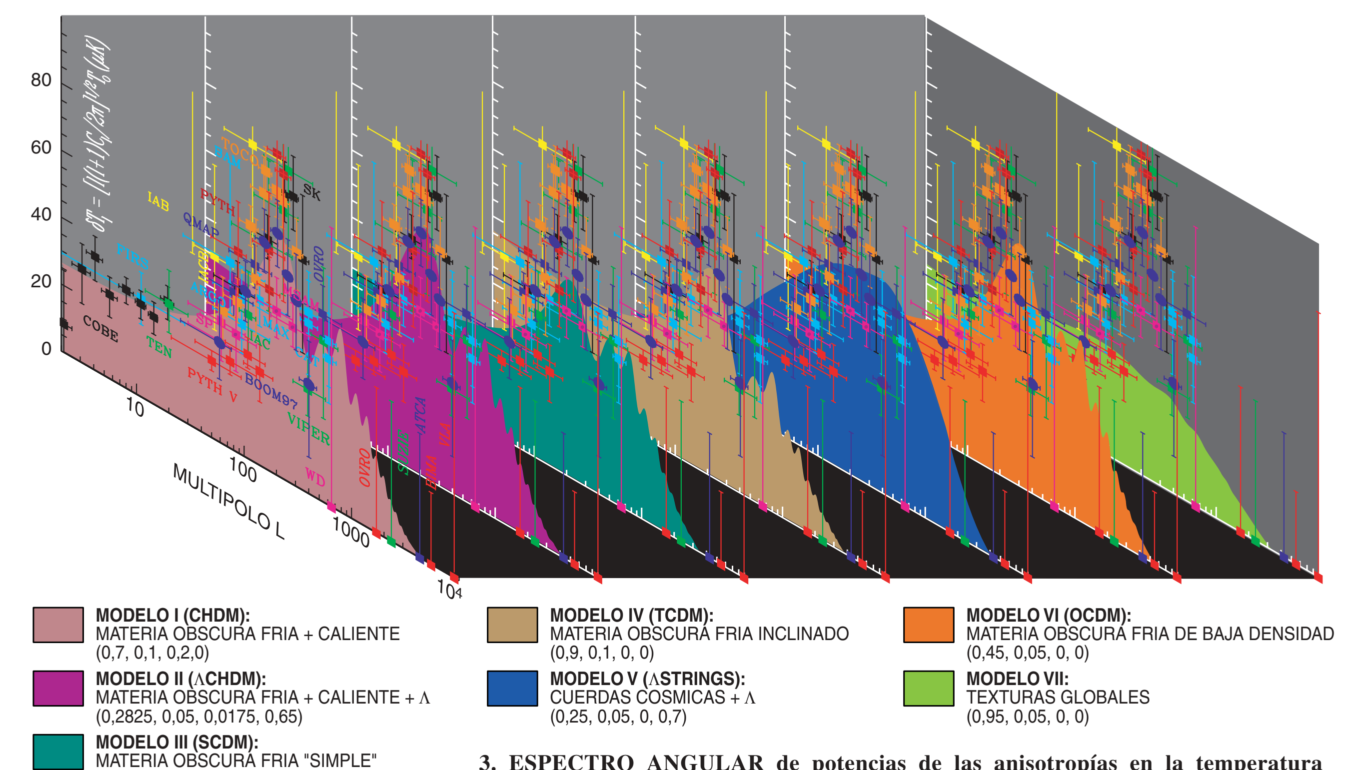
Aquí el papel preponderante corresponde a la gravedad. Bastan sutiles perturbaciones de gran longitud de onda en la densidad de materia para distorsionar el espacio y generar pozos de potencial. Una sobredensidad en un lugar generará una subdensidad en su vecindad. Así, las geodésicas de los fotones se verán distorsionadas y éstos perderán energía al escapar de los pozos gravitatorios (sobredensidades) originando manchas frías pequeñas e irregulares en el mapa térmico.

Luego de este período, los fotones de la RFM se propagarán libremente, sin entrar apenas en interacción. Por el contrario, las perturbaciones en la densidad de materia sufrirán una fuerte evolución, ya que son las semillas de las galaxias y cúmulos observables hoy. A grandes escalas angulares, la RFM es nuestra instantánea más precisa de la distribución del potencial gravitatorio cuando el universo contaba unos 400.000 años de edad.

Modelos más complicados pueden modificar el cuadro. En un cosmos de baja densidad, la variación temporal del potencial gravitatorio seguirá influyendo en la RFM más allá de la última difusión. Por su lado, la evolución de los defectos topológicos cósmicos —“fracturas y agujeros” en el tejido espaciotemporal formados en transiciones de fase durante la expansión y enfriamiento del universo— perturbará sin cesar el fondo de radiación a lo largo del viaje de los fotones, dejando una huella característica en su espectro.



2. EL EFECTO DOPPLER debido al movimiento de nuestro sistema solar es el origen de este mapa de la radiación de fondo de microondas detectada por el COBE. La observación se produjo a una frecuencia de 53 gigahertz. Cubre todo el cielo con una precisión del milikelvin en las anisotropías de la temperatura del fondo cósmico. La imagen está en coordenadas galácticas y el plano de la Vía Láctea se halla dispuesto en forma horizontal a través de la figura. Las constelaciones del Cisne, Sagitario y Orión se ubican a la izquierda, centro y derecha, respectivamente. La radiación en el sentido del movimiento aparece con mayor intensidad (*color amarillo rojizo*), mientras que en las antípodas del cielo su intensidad está por debajo de la media (*color azul violáceo*). El análisis de los datos revela que nuestro Grupo Local de galaxias se desplaza a una velocidad de 600 km/segundo con respecto al sistema en reposo de la RFM.



3. ESPECTRO ANGULAR de potencias de las anisotropías en la temperatura de la RFM para siete modelos cosmológicos representativos, junto con datos experimentales. Las barras de error verticales muestran estimaciones con nivel de confianza del 68 %, mientras que los límites superiores son dados al 95 %. Las barras horizontales muestran aproximadamente la incertidumbre en multipolos angulares para cada experimento en particular. [Compilación de datos cortesía de M. Tegmark]. Bajo cada modelo se detallan los valores de los parámetros cosmológicos utilizados en orden (Ω_c, Ω_B, Ω_ν, Ω_Λ), correspondientes a materia obscura fría (c), bariones (B), neutrinos (ν, una familia de neutrinos masivos) y constante cosmológica (Λ). Definimos Ω_B la fracción de bariones en la densidad crítica. El parámetro de Hubble "h" es siempre 0,5 excepto para OCDM (0,6) y ΛCHDM (0,65). El índice espectral escalar es siempre 1 salvo para TCDM donde se usó 0,8. Los espectros fueron calculados con el programa CMBFAST, excepto para ΛStrings y texturas globales que son cortesía de U. Seljak.

El grupo del COBE obtuvo la imagen de las anisotropías de la radiación cósmica de fondo. Pero no se proyectó tal registro para medir el diminuto nivel de polarización que la teoría predice para dicha radiación. Así, aunque claves para la cosmología, los resultados del satélite no permitían discriminar entre modelos de formación de estructuras. Además, en sus datos se encontraron características que apartaban a la RFM de una distribución gaussiana, contra todo pronóstico de los partidarios de los modelos de la inflación cósmica. Para tranquilidad de éstos, los análisis posteriores revelaron que la base de datos del COBE no estaba exenta de sesgos sistemáticos. Lo cierto es que se requieren experimentos de alta resolución angular y máxima cobertura espacial para terminar el trabajo iniciado por el COBE y resolver todos los interrogantes abiertos.

La sonda MAP medirá las pequeñas anisotropías en la RFM en cinco frecuencias, entre los 22 y los 90 gigahertz con una sensibilidad de 20 microkelvin, luego de dos años de integración. Al igual que en el COBE, las antenas del MAP medirán variaciones en la temperatura T, no los valores absolutos de T. Al observar diferencias de temperatura entre puntos del cielo separados en 141º, se cancelan la mayoría de las señales espurias. La resolución angular del MAP, de unos 20 minutos de arco, se traduce en la esperanza de medir los coeficientes C_ℓ con barras de error ínfimas, cubriendo la región de los tres primeros picos acústicos.

Operan ya globos estratosféricos y radiotelescopios terrestres dedicados a reunir o analizar datos concernientes a la radiación cósmica de fondo. En ese ámbito, las misiones BOOMERanG y MAXIMA ya dieron sus frutos. BOOMERanG, un programa conjunto italo-americano, se sirvió de un grupo de bolómetros (detectores de radiación) instalados en la barquilla de un globo estratosférico. Su misión de 1998 aprovechó los vientos antárticos para realizar un vuelo circular alrededor del polo Sur durante 10 días. En el verano austral 98/99 barrió frecuencias desde los 90 a los 400 gigahertz, complementando el barrido proyectado para el MAP y compitiendo con éste en precisión y resolución angular.

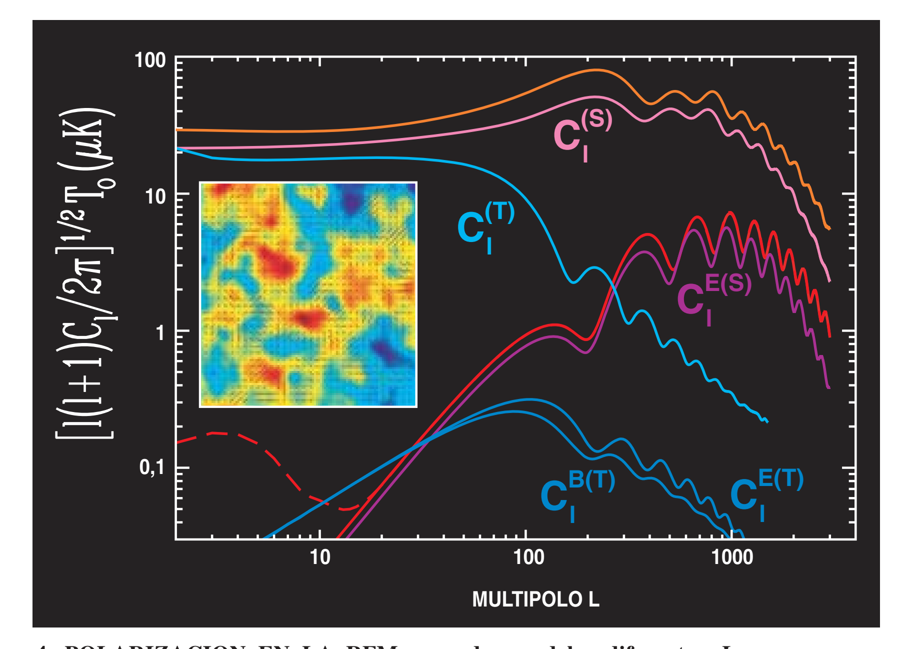
Con el uso de globos en lugares fríos y secos se ahorran interferencias de contaminantes; el vapor de agua de la atmósfera, por ejemplo, emite en microondas. Además, a frecuencias por encima de los 90 gigahertz, el contaminante galáctico principal es la emisión térmica del polvo, razón por la cual el trozo de cielo que el BOOMERanG seleccionó en el hemisferio meridional era uno de los más limpios en polvo galáctico.

Desde un principio, la posición y amplitud de los picos acústicos se consideraron los mejores discriminantes entre los modelos de formación de estructuras, como la inflación y los defectos topológicos cósmicos. La falta de coherencia en las perturbaciones generadas por la evolución de una red de defectos borra las oscilaciones secundarias del espectro angular de potencias.

Además, la determinante contribución de los modos tensoriales y rotacionales deja poco espacio para los modos escalares, los únicos que exhiben la necesaria inestabilidad gravitacional que llevará a la formación de estructuras astrofísicas y que son los responsables de los principales picos del espectro. Actualmente, a los modelos más simples de defectos topológicos no les va muy bien. Lo que no deja de tener su punto de ironía, si recordamos que en los defectos topológicos veían Yaakov Zel'dovich y Thomas Kibble, a mediados de los setenta y antes del advenimiento de la inflación, las semillas de la formación de estructuras.

En lo que concierne a los datos observacionales de la RFM recogidos, hay una cosa cierta: existe un primer pico en amplitud de δT_ℓ de unos 80 microkelvin recientemente detectado por las misiones BOOMERanG, MAXIMA y DASI. Se hallan luego otros picos secundarios de menor amplitud y finalmente un decrecimiento para multipolos mayores verificado por el ingenio "Captador de Imágenes del Fondo Cósmico" (CBI). A las escalas angulares más pequeñas, el espectro de la RFM pierde amplitud de forma abrupta. En efecto, en 1968 Joseph Silk mostró que, durante el tiempo de la última difusión y debido al acoplamiento imperfecto entre los bariones y la RFM, las perturbaciones menores que la longitud de difusión de los fotones se amortiguarían exponencialmente. (Las refinadas observaciones de BOOMERanG y MAXIMA indican que nuestro universo es espacialmente plano.)

Pronto se comprendió que las anisotropías en la temperatura de la radiación de fondo no eran el único banco de pruebas para explorar el universo temprano. Había que detectar y estudiar la polarización de la radiación cósmica de fondo, correlacionar temperatura y polarización, acometer rastreos ópticos y de corrimiento hacia el rojo de galaxias, levantar censos de campos de velocidades astrofísicos y observar supernovas de tipo Ia.

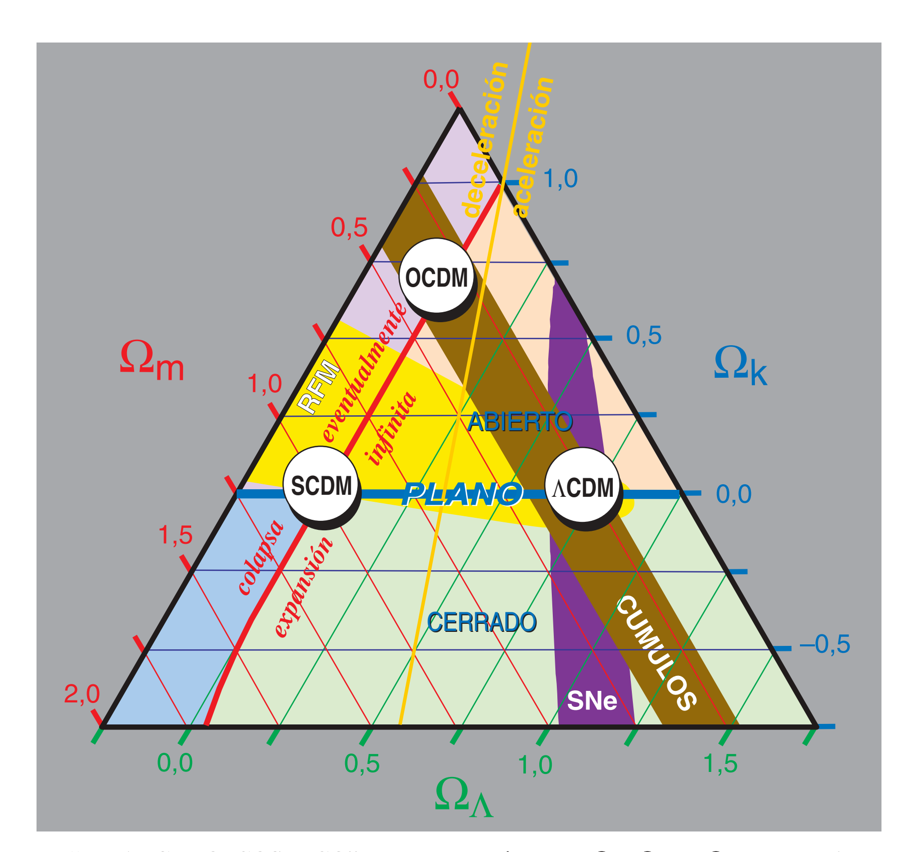


4. POLARIZACION EN LA RFM para dos modelos diferentes. Las curvas naranja y rojas (*sin etiquetas*) son los espectros angulares correspondientes al modelo ΛCHDM, con reionización (*línea roja discontinua*) y sin ella (*línea roja continua*). El espectro de fluctuaciones en la temperatura es virtualmente el mismo con ambas historias de ionización (*curva naranja*). En el modelo de reionización, el universo se reioniza súbitamente a bajo corrimiento al rojo con profundidad óptica Compton de 0,05. Las curvas azules y violetas representan un modelo SCDM pero con una alta contribución de modos tensoriales, con índices espectrales invariantes de escala. Las curvas superiores muestran separadamente las contribuciones a la temperatura por parte de los modos escalares (S) y tensoriales (T). Las curvas de la polarización de tipo E y B generadas por modos tensoriales son etiquetadas E(T) y B(T) respectivamente. También mostramos en el recuadro un mapa del cielo de 2,5º × 2,5º con una simulación (cortesía de M. Zaldarriaga) de la temperatura y la polarización para el modelo SCDM.

Martin Rees consideró, ya en 1968, la posibilidad de una RFM polarizada. Transcurridos más de treinta años, seguimos sin detectar el campo de polarización. Nuevos ensayos en globos, en el marco del proyecto BOOMERanG, contarán con detectores sensibles a la polarización y pondrán a prueba nuevas técnicas a emplear en la sonda europea *Planck*. La sonda MAP también contará con estos detectores y tendrá una sensibilidad superior a los 10 microkelvin en sus canales de baja frecuencia.

La polarización constituye un test importante para los modelos cosmológicos, a la vez que nos ayudará a recorrer la historia de ionización del universo. Surge exclusivamente de la interacción entre fotones de la RFM y electrones libres. Por tanto, la polarización sólo pudo generarse durante la última difusión. Su amplitud depende de la duración del proceso de desacople y, a diferencia de las fluctuaciones en la temperatura, no se resentirá de las variaciones del potencial gravitatorio. Mediciones futuras de la polarización proveerán un panorama claro de las inhomogeneidades presentes en el universo a unos 400.000 años de la gran explosión.

Para entender el proceso de polarización de la radiación de fondo, conviene dejar bien claros algunos puntos. Primero, la energía de los fotones es pequeña, comparada con la masa de los electrones. La frecuencia de la RFM no cambia en la interacción, ya que el retroceso de los electrones es despreciable. Segundo, el cambio en la polarización (esto es, en la orientación del campo eléctrico oscilante de la radiación) ocurre debido a una transición llamada difusión Thomson. La probabilidad de transición por unidad de tiempo es proporcional al cuadrado del producto escalar entre las direcciones de polarización antes y después de la transición. O lo que es lo mismo, se privilegiará la dirección de polarización inicial. Tercero, un campo eléctrico osci-



5. "TRIANGULO COSMICO", con los parámetros Ω_k, Ω_m y Ω_Λ. La cantidad Ω_k da la contribución energética de la curvatura espacial (definida positiva para universos de curvatura negativa) y Ω_m incluye todas las formas de materia-energía obscura o visible habituales. Cada punto del enrejado triangular satisface la regla simple $\Omega_k + \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$, fácilmente deducible de las ecuaciones de Einstein. La línea azul horizontal con $\Omega_k = 0$, etiquetada PLANO, separa el caso de un universo hiperbólico con espacio de curvatura negativa constante ("abierto") del caso de un universo esférico (cerrado). La curva roja divide entre posibles destinos futuros: la contribución de una energía de vacío positiva dominará sobre las otras formas de materia-energía en algún momento de la evolución y, dada su presión negativa, hará que el universo se expanda por siempre. Sin embargo, esta suerte podría evitarse si el espacio estuviera fuertemente curvado positivamente y con un alto contenido en materia (*parte inferior izquierda del diagrama*). La línea amarilla separa universos actualmente acelerados de los que se encuentran en desaceleración. Las bandas observacionales de probabilidad de un nivel de confianza del 68 % muestran tres tests restrictivos: la RFM (*en amarillo, prefiere un universo plano*), la física de cúmulos de galaxias (*en marrón, da preferencia a un universo de baja densidad*) y las mediciones de supernova (*en violeta, prefieren una importante contribución de* Λ). En el diagrama también se muestra la posición de modelos de tipo SCDM, OCDM y ΛCDM. Este último se ubica en la región en aceleración y está entre los que mejor reproducen las observaciones. (Cortesía de P. Steinhardt.)

lante de la radiación hará que el electrón también oscile; éste se comportará entonces como un dipolo (que no debe confundirse con el dipolo de la RFM) y la radiación dipolar se emitirá preferencialmente en dirección perpendicular a la dirección de oscilación.

Antes de la época de la recombinación, el campo de la radiación no estaba polarizado. El campo eléctrico de la RFM puede descomponerse en dos direcciones ortogonales, $\hat{x}$ y $\hat{z}$, perpendiculares a su vez a la línea de propagación $\hat{y}$. El campo eléctrico a lo largo de $\hat{z}$ (siendo $\hat{z}$ vertical) hará que el electrón oscile también verticalmente. De ahí que la radiación dipolar será máxima sobre el plano horizontal *xy*. Análogamente, la radiación dipolar debida al campo eléctrico a lo largo de $\hat{x}$ se verá maximizada sobre el plano *yz*. Si ahora miramos desde el costado (desde la dirección $\hat{x}$, sobre el plano horizontal, y perpendicularmente a la dirección de incidencia $\hat{y}$) veremos un tipo especial de radiación difundida. Desde nuestra posición no podemos percibir la radiación que emite el electrón oscilante en la dirección $\hat{x}$, pues esta radiación va al plano *yz*, ortogonalmente dispuesto respecto a nuestra ubicación. Así pues, es *como si* sólo la componente vertical del campo eléctrico entrante produjera la radiación que percibimos.

Pero sabemos que existe una probabilidad máxima de que la polarización de la radiación emergente esté alineada con la incidente. En breve, la radiación emitida se hallará linealmente polarizada. Ahora bien, puesto que la dirección de la radiación incidente y nuestra posición como observadores eran arbitrarias, no se alterará el resultado si las variamos: la difusión Thomson convertirá lo que era un fondo no polarizado de radiación en la RFM linealmente polarizada que un día se espera detectar.

No acaba aquí la historia. Para obtener el efecto total, hemos de considerar todas las direcciones posibles de procedencia de los fotones que vienen a interaccionar con el electrón "blanco" de las colisiones, y sumarlas. Es simple entender que, en el caso de una distribución de radiación inicial isótropa, las distintas aportaciones individuales se cancelarán mutuamente. Baste un argumento de simetría: en una configuración con simetría esférica no existe una dirección privilegiada. Se prohíbe la generación de polarización, pues ésta seleccionaría una dirección particular.

Pero la RFM no es exactamente isótropa. Con una precisión del milikelvin el modo dominante es dipolar. ¿Alcanzará con esta distribución dipolar para generar la polarización? No, el dipolo no generará una señal. Aislemos un electrón y consideremos un campo de radiación incidente sobre éste, con mayor intensidad desde su izquierda que desde su derecha, y con intensidades interpolando entre estos dos valores por debajo y por encima de él. (Al fin y al cabo eso es un dipolo.) Bastará entonces sumar todas las contribuciones para ver que no quedará traza de polarización residual.

Si la RFM poseyera una variación cuadrupolar en la temperatura, entonces habría un exceso de polarización vertical, generada por los fotones incidentes de la derecha e izquierda (más calientes que la media) con respecto a la polarización horizontal procedente de la radiación incidente de arriba y abajo (más fría). Pues bien, este cuadrupolo en la RFM sí existe y fue detectado por el COBE. Desde cualquier punto de vista, las contribuciones ortogonales serán diferentes, dejando tras de sí un nivel de polarización lineal en la radiación difundida.

En el marco de modelos con recombinación estándar, el nivel pronosticado de polarización es diminuto, por ser muy pequeño el cuadrupolo en la distribución de radiación, generado mientras los fotones viajan entre sucesivas difusiones. Las dispersiones múltiples terminan por crear un plasma demasiado homogéneo. Sólo las perturbaciones de longitudes de onda lo suficientemente cortas producirán anisotropías durante la trayectoria libre media de los fotones llevando a un valor significativo del cuadrupolo y, por consiguiente, de la polarización resultante.

En efecto, el modelo cosmológico estándar de materia obscura fría predice un nivel no superior a 0,05 microkelvin para escalas angulares mayores que unos pocos grados. De ahí que la detección del campo de polarización sea un verdadero desafío experimental.

La polarización aumenta a escalas del grado angular en modelos simples. Se prevé un gran chichón en el espectro con oscilaciones acústicas sobrepuestas que alcanza los 5 microkelvin. Mediante dos componentes independientes, E y B, podemos describir la polarización. Las perturbaciones escalares de densidad no producen polarización B. Esto es importante puesto que una eventual detección de dicho componente será una señal inequívoca de la existencia de un fondo de ondas gravitatorias. Si el universo sufrió una reionización global luego de la recombinación, habrá entonces una superficie de última difusión más reciente. El correspondiente horizonte será mayor, transfiriendo potencia a las grandes escalas angulares del componente E.

La polarización de la RFM encierra una "mina de oro" en espera de beneficio por la cosmología. A ella se aplicará quizá la Estación Espacial Internacional. El *Observatorio de Polarización del Firmamento* (proyecto europeo SPOrt) podría alojarse en la Estación Espacial y convertirse en el primer experimento de microondas europeo en el espacio. Se planea su vuelo para 2003 y entraría en funcionamiento justo después del MAP, con un rango de frecuencias entre 22 y 90 gigahertz, una resolución de 7 grados y una cobertura bruta del cielo de más del 80 %.

Las recientes observaciones de supernovas de tipo Ia con corrimientos al rojo de hasta $z \approx 1$ favorecen la existencia de una constante cosmológica Λ o de otra forma de energía obscura que resista el desplome gravitatorio. Estas explosiones de estrellas remotas cambiaron de forma radical la cosmología estándar. A la curvatura del espacio debemos ahora agregar el conocimiento preciso de la ecuación de estado cósmica en todas las épocas cosmológicas. En efecto, en presencia de esta energía de vacío un universo de baja densidad podría colapsar, mientras que otro con energía por encima de la crítica podría expandirse por siempre.

Mediciones precisas revelaron que dichas supernovas son más tenues y que se hallan, en promedio, entre un 10 y un 15 % más alejadas de lo que se esperaría en un universo estándar en desaceleración. Así, lejos de frenarse por la atracción gravitatoria entre sus constituyentes, la expansión del universo a las mayores escalas astrofísicas se hallaría en aceleración. Si tal fuera el proceso, la inclusión de materia obscura con considerable presión negativa para contrarrestar el freno gravitatorio sería la única forma de explicar los datos observacionales. La constante Λ, introducida por Einstein en 1917, actuaría como un tal componente de energía repulsiva.

Los campos de quintaesencia (Q) son otra propuesta teórica reciente. A diferencia de Λ, los campos Q serían variables en el tiempo y desarrollarían inhomogeneidades. Estas dejarían señales observables en la forma de la distribución de galaxias y cúmulos, así como también en los espectros de temperatura y polarización de la RFM. Además, la dinámica de los campos Q ajustaría su densidad de energía actual para hacerla comparable con la de la materia estándar. Esto explicaría por qué tales campos dominan hoy la expansión esquivando los varios tests cosmológicos sobre su presencia en el universo temprano.

Sin embargo, buena parte de la comunidad científica se siente incómoda con este quinto componente cosmológico, Λ o sus variantes, pues no hay una clara explicación teórica sobre su existencia y valor. Aun así, los análisis basados en estudios de rayos X de cúmulos ricos en galaxias o fundados incluso en las propiedades de radiogalaxias de doble lóbulo han avanzado pruebas observacionales que revelan un acuerdo cabal con las supernovas de tipo Ia. Exigen algunos un mayor número de estudios de supernovas de alto corrimiento al rojo para asegurarse de que la aceleración cósmica no es sólo fruto de un artefacto producido por efectos sistemáticos observacionales.

En resumen, la RFM contiene una inmensa riqueza de información para la cosmología. Los experimentos de microondas futuros, sumados a otros tests astrofísicos, acotarán los posibles modelos que buscan explicar uno de los problemas más fundamentales, el de la formación de estructuras en el universo.

Bibliografía complementaria

COSMIC GLOWS, D. Scott, xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/9912038.

IN SUPPORT OF INFLATION, A. Gangui, en *Science*, vol. 291, n.º 837 2001.

ECOS DE LA GRAN EXPLOSIÓN, R. R. Caldwell y M. Kamionkowski. UN CARTÓGRAFO CÓSMICO, Ch. L. Bennett, G. F. Hinshaw y L. Page. EL UNIVERSO Y SU QUINTAESENCIA, J. P. Ostriker y P. J. Steinhardt. LA ENERGÍA OSCURA, P. Ruiz-Lapuente. EL SENTIDO DE LA COSMOLOGÍA MODERNA, P. James E. Peebles. UNA NUEVA TEORÍA DEL UNIVERSO, João Magueijo, en *Investigación y Ciencia* n.º 294, marzo de 2001.

Origen mineral de la vida

El aire, el agua y las rocas constituían las únicas materias primas de la Tierra primitiva. Con esos recursos tuvieron que construirse los primeros seres vivos. Nuevos experimentos dan a entender que ciertos minerales cumplieron un papel decisivo en tan extraordinario proceso

Robert M. Hazen

No se sabe cómo nació la vida en la Tierra joven, tan desolada. Pero hay una cosa segura: el origen de la vida fue un fenómeno químico. Una vez formado el planeta, hace 4500 millones de años, los impactos de los meteoritos fueron destrozando periódicamente y manteniendo estéril su superficie durante 500 millones de años. Y sin embargo, sólo unos cientos de millones de años después de esa era infernal aparecía y medraba la vida microscópica. En algún momento intermedio se había montado con aire, agua y piedra el primer ser vivo.

De esas tres materias primas, a la atmósfera y los océanos se les han venido atribuyendo desde hace mucho en los guiones del origen de la vida los papeles estelares. Las rocas, y los minerales que las componen, han sido sólo figurantes o meras piezas del atrezzo. Ahora se va comprendiendo que ese reparto restrictivo es un error. Ultimamente, una serie de experimentos apasionantes está descubriendo que a los minerales les tocó un papel decisivo en las reacciones químicas básicas de las que hubo de surgir la vida.

En el primer acto de la historia del origen de la vida tuvieron que aparecer conjuntos de moléculas de carbono capaces de sintetizar copias de sí mismas. Para llegar siquiera a ese paso preliminar en la evolución, hubo de haber una secuencia de transformaciones químicas que fueran añadiendo niveles nuevos de estructuración y complejidad a un grupo de moléculas orgánicas. Los compuestos de carbono más abundantes de que se disponía en la Tierra primordial eran gases con sólo un átomo de carbono por molécula: el dióxido y el monóxido de carbono y el metano. Pero los ladrillos esenciales de los organismos vivos —glúcidos ricos en energía, lípidos capaces de formar membranas y aminoácidos complejos— pueden tener hasta más de una docena de átomos de carbono por molécula. A su vez, las moléculas han de combinarse entre sí para construir las cadenas poliméricas y demás disposiciones moleculares necesarias para la ejecución de las tareas químicas de la vida. Debió de ser especialmente difícil engarzar moléculas pequeñas hasta producir esas macroestructuras complejas en las condiciones extremas de la Tierra primigenia, donde la intensa radiación ultravioleta escindía los agregados moleculares en cuanto se creaban.

Las moléculas con esqueleto de carbono necesitaron protección y ayuda para llegar a lo que llegaron. Sabemos ahora que los minerales pudieron cumplir al menos cinco funciones importantes, como accesorios pasivos o agentes activos, en las reacciones químicas que fueron generando la vida. Pequeños compartimentos dentro de las estructuras minerales pueden hospedar moléculas simples, mientras que las superficies minerales dan el andamio donde se ensamblan y crecen esas moléculas. Aparte de servir como refugio y sostén, las caras cristalinas de ciertos minerales escogen activamente moléculas determinadas, parecidas a las que estaban destinadas a adquirir interés biológico. Los iones metálicos de otros minerales pueden catalizar reacciones importantes, como las que debieron de convertir unas moléculas simples en entidades capaces de autorreplicarse. Nada ha sorprendido quizá más que haber encontrado hace poco indicios de que algunos elementos de minerales disueltos pueden incorporarse en las moléculas biológicas. En otras palabras: puede que los minerales no sólo facilitaran la formación de moléculas biológicas, sino también que pasaran a ser parte de la vida misma.

El experimento de Miller

Durante casi un siglo, tras la publicación en 1859 del *Origen de las especies* de Charles Darwin, todo un desfile de científicos hizo cábalas acerca de los orígenes químicos de la vida. Algunos fueron tan prescientes que mencionaron las rocas y los minera-

El autor

ROBERT M. HAZEN, catedrático de geología de la Universidad George Mason, lleva explorando el comportamiento de los minerales bajo grandes presiones en el Laboratorio Geofísico de la Institución Carnegie desde 1976. En los últimos cinco años ha preparado muchos de sus experimentos con minerales de manera que reproduzcan las grandes presiones que hay en los entornos de las fuentes hidrotermales de las profundidades oceánicas.

les en las historias de su invención. Pero las pruebas experimentales sólo respaldaron de vez en cuando sus conjeturas.

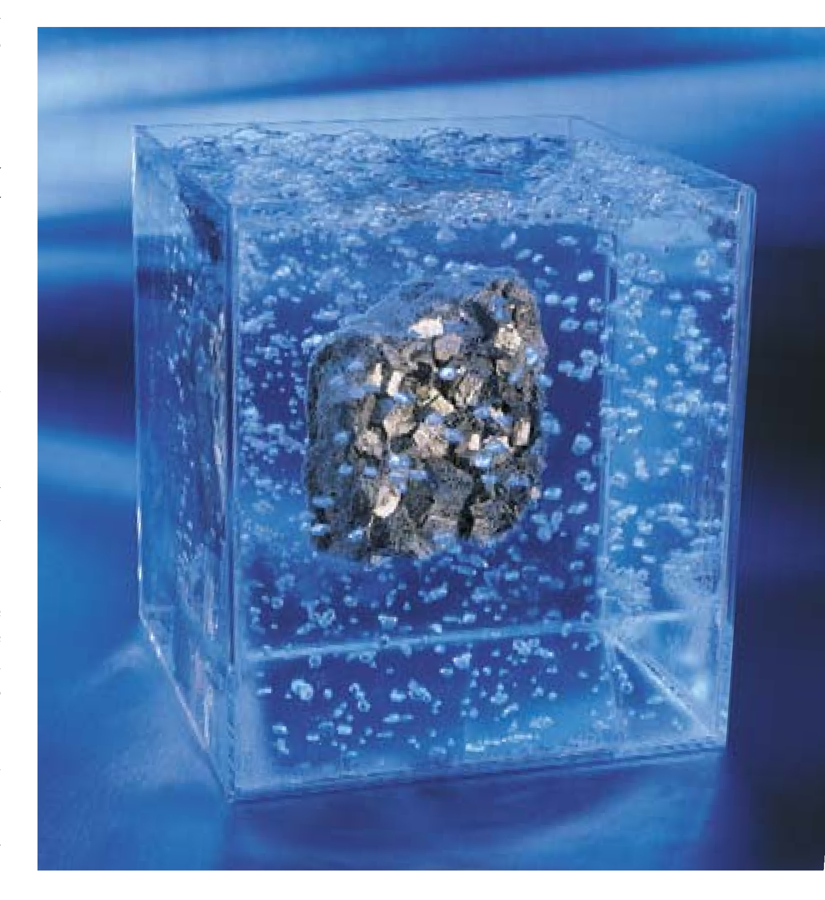
Uno de los experimentos más famosos se llevó a cabo en la Universidad de Chicago en 1953. Ese año, Stanley L. Miller, alumno de doctorado de Harold C. Urey, intentó imitar los océanos y la atmósfera primitivos de la Tierra. En un recipiente de cristal relleno parcialmente con agua encerró metano, amoníaco y otros gases de los que se pensaba fueron los componentes de la atmósfera primitiva. Cuando sometió la mezcla de gases a descargas eléctricas, para remedar una tormenta eléctrica prehistórica, el agua transparente se volvió rosa y luego marrón a medida que fue enriqueciéndose con aminoácidos y otras moléculas orgánicas esenciales. Con tan sencillo procedimiento experimental, Miller transformó el curso de la investigación de los orígenes de la vida, hasta entonces lucubración filosófica. La prensa presentó de forma sensacionalista el hallazgo y dio a entender que pronto saltarían bichos sintéticos de los tubos de ensayo. Los científicos fueron más comedidos, pero muchos tuvieron la impresión de que se había superado el mayor obstáculo que los separaba de la creación de vida en el laboratorio.

No pasaría mucho antes de que se les cayese la venda de los ojos. Miller habría descubierto una forma de hacer muchos de los componentes de la vida a partir del aporte original de agua y gas de la Tierra, pero no cómo o dónde se fueron conjugando esas unidades simples hasta crear las complejas estructuras moleculares —las proteínas, el ADN— inherentes a la vida.

En busca de una solución del problema, Miller y otros dedicados al estudio de los orígenes empezaron a pensar que las rocas hicieron quizá de puntales. Conjeturaron que las moléculas orgánicas que flotaban en las aguas oceánicas pudieron acabar en lagunillas creadas por las mareas a lo largo de las costas rocosas. Ciclo de evaporación tras ciclo de evaporación, esas moléculas se habrían ido concentrando más, hasta devenir una sopa espesa.

En los últimos años, en cambio, se ha venido pensando que los ingredientes de la vida pudieron acumularse en ambientes mucho menores. Hay rocas, como la piedra pómez volcánica gris, que están horadadas por bolsas de aire creadas al expandirse los gases dentro de ellas cuando estaban todavía fundidas. A muchos minerales comunes, al feldespato, por ejemplo, les salen hoyos microscópicos con la erosión. Cada minúscula cámara de cada roca de la Tierra primigenia podría haber albergado un experimento aislado de autoorganización molecular. Con tiempo y cámaras suficientes, el azar habría producido una combinación de moléculas que finalmente se mereciesen que se las llamara "vivas".

Tras muchas de estas conjeturas estaba la impresión de que la vida era tan frágil que necesitó de las rocas para sobrevivir. Pero un notable descubrimiento de 1977 puso en entredicho la común idea de la fragilidad de la vida y, también quizás, lo que creía saberse ya acerca de sus orígenes. Hasta entonces, se daba por sentado que la vida brotó en la superficie tranquila del mar, o en su vecindad, como resultado de procesos químicos alimentados por la luz solar. Este punto de vista cambió cuando la exploración del océano profundo encontró diversos ecosistemas que medraban en las más que calientes bocas de los humeros volcánicos del suelo oceánico. Estos entornos



1. LAS TEORIAS SOBRE EL ORIGEN DE LA VIDA se han sucedido a lo largo de la historia. El experimento de Miller permitió pasar del terreno de la especulación al del ensayo en el laboratorio. Con el descubrimiento, en 1977, de una eclosión de formas orgánicas en los humeros oceánicos se puso en entredicho la idea que asociaba la aparición de la vida a la superficie tranquila del mar. El autor da un paso más y concede una importancia fundamental a los minerales, que aportaron la energía y permitieron el desarrollo de reacciones químicas favorables a la síntesis de moléculas biológicas.



2. EL FELDESPATO podría constituir una pieza clave en los procesos que desembocaron en el nacimiento de la vida. Con la erosión se forman en él unos hoyuelos microscópicos, donde podrían haberse presentado los primeros experimentos de autoorganización molecular.

extremos consiguen mantener complicadas comunidades de criaturas aisladas del sol. En esos ámbitos oscuros, buena parte de la energía que necesitan los organismos no procede de la luz, sino del calor interno de la Tierra. Sabiendo esto, algunos empezaron a preguntarse si no podrían haberse producido las reacciones orgánicas que necesitaba la vida en el calor y presión intensos de esas fumarolas hidrotermales.

Miller y sus compañeros objetaron, contra la hipótesis del origen hidrotermal, que los aminoácidos se descomponen deprisa con el calor. Pero se descubrió luego que la objeción sólo era válida si se dejaban fuera de la ecuación minerales clave. La idea de que los minerales quizá hubiesen sido un refugio de los ingredientes de la vida se fortaleció gracias a unos experimentos realizados en mis reales, el Laboratorio Geofísico de la Institución Carnegie de Washington. Según Jay A. Brandes, los minerales conseguían que permaneciesen intactos los delicados aminoácidos. Hicimos en 1998 un experimento en el que el aminoácido leucina se degradó en cosa de minutos en agua presurizada a 200 grados C, tal y como Miller y sus compañeros predecían. Pero cuando Brandes añadió a la mezcla un mineral, sulfuro férrico, del tipo que por lo normal se encuentra en las fumarolas hidrotermales, el aminoácido persistió inalterado durante días, tiempo más que suficiente para reaccionar con otras moléculas fundamentales.

Anclaje en la roca

Aunque las materias primas correctas se hallaran en un lugar protegido —una laguna de marea, un hoyo microscópico en una superficie mineral o la boca de una chimenea hidrotermal—, las moléculas no dejarían de estar suspendidas en el agua. Esas moléculas flotantes necesitaban una estructura de sostén —una especie de andamio— donde aferrarse para reaccionar unas con otras.

Para reunir las moléculas a partir de una solución diluida basta concentrarlas en una superficie plana. Las moléculas errantes podrían haber sido arrastradas a la calma superficie de una laguna de marea o quizás a una primitiva "película aceitosa" de compuestos atrapados en la superficie del agua. Pero unos entornos así habrían planteado un riesgo en principio fatal a las delicadas moléculas. Violentas tormentas eléctricas y radiaciones ultravioletas atacaban la Tierra joven en cantidades mucho mayores que las actuales. Esas condiciones habrían roto rápidamente los enlaces de las cadenas moleculares complejas.

Los geoquímicos que estudian el origen de la vida saben desde hace mucho que otras superficies que habrían venido muy bien para que se ensamblasen moléculas importantes eran las que ofrecían los minerales. Hace medio siglo, algunos estudiosos se percataron de que las arcillas tienen una capacidad especial de atraer moléculas orgánicas. Esos minerales ubicuos se vuelven untuosos al mojarse porque sus átomos forman capas planas y lisas. Las superficies de esas capas tienen con frecuencia una carga eléctrica capaz de atraer a moléculas orgánicas y retenerlas. Los experimentos confirmarían luego estas conjeturas. A finales del decenio de 1970 un grupo de investigadores israelíes mostró que los aminoácidos pueden concentrarse en superficies de arcilla e irse engarzando en cadenas cortas que recuerdan a proteínas biológicas. Estas reacciones químicas se producían cuando los investigadores hacían que se evaporase una solución acuosa de aminoácidos en un recipiente revestido de arcilla, situación no del todo diferente a la evaporación de una charca somera o laguna de marea de fondo cenagoso.

Hace menos, sendos equipos de investigación, dirigidos por James P. Ferris, del Instituto Politécnico Rensselaer, y por Gustav Arrhenius, de la Institución Scripps de Oceanografía, demostraron por separado que las arcillas y otros minerales lamelares atraían y ensamblaban diversas moléculas orgánicas. A lo largo del último decenio, el equipo del Rensselaer halló, tras una serie monumental de experimentos,

que las arcillas pueden hacer de andamios para la construcción de componentes del ARN, la molécula que traduce en proteínas la información genética de los organismos.

Una vez adheridas las moléculas orgánicas al andamio mineral, se habría podido ya sintetizar muchos tipos de moléculas complejas. Pero sólo unas pocas acabaron incorporadas en las células de los seres vivos. Algún tipo de molde, pues, debió de seleccionar las moléculas primitivas que terminarían por tener valor biológico. Los experimentos recientes muestran, una vez más, que los minerales podrían haber desempeñado un papel fundamental en esa tarea.

Quiralidad

Puede que el más misterioso episodio de la evolución fuese el que dejó a todos los organismos vivos con un extraño predominio de un tipo determinado de aminoácido. Como pasa con muchas moléculas orgánicas, de los aminoácidos hay dos variantes. Cada versión consta de los mismos tipos de átomos, pero la molécula de una es una imagen especular de la del otro. A este fenómeno se le llama quiralidad y existe, pues, una versión "levógira" ("L") y una "dextrógira" ("D"). Los experimentos de síntesis orgánica por el estilo del de Miller producen siempre mezclas al cincuenta por ciento de moléculas L y D, mientras que en los seres vivos hay casi un cien por cien de aminoácidos levógiros.

Se han propuesto docenas de teorías para explicar este curioso fenómeno. Algunos astrofísicos han sostenido que la Tierra pudo formarse con un excedente de aminoácidos L como consecuencia de procesos que sucedieron en la nube de polvo y gas de donde surgió el sistema solar. El mayor problema de esta teoría es que tales procesos generan excedentes insignificantes —menos de un uno por ciento— de moléculas L o D.

Pudo, en cambio, ocurrir que la mezcla inicial empezase con una mezcla a partes iguales de aminoácidos L y D, y se diera luego alguna característica importante del entorno físico que privilegiase una de las versiones. Para mí, el candidato ideal de un tal entorno son las caras de los cristales cuyas estructuras superficiales son imágenes especulares unas de otras. La primavera del año pasado me centré en la calcita, el mineral, muy corriente, de que están hechos la caliza y el mármol, en parte porque suele exhibir magníficos pares de caras especulares. La estructura química de la calcita de las conchas de muchos moluscos se enlaza fuertemente con aminoácidos. Sabiendo esto, empecé a sospechar que las superficies de calcita podrían quizá tener sitios de enlace químico idealmente adaptados a sólo un tipo u otro de aminoácido. Con la colaboración de Timothy Filley y de Glenn Goodfriend, hice más de cien comprobaciones de esta hipótesis.

Nuestros experimentos eran conceptualmente simples, pero había que proceder con mucho cuidado en salas limpias para evitar que se contaminasen con los aminoácidos que hay por todas partes. Sumergíamos un cristal bien formado, grande como un puño, de calcita en una solución a partes iguales de ácido aspártico, un aminoácido común. A las veinticuatro horas sacábamos el cristal de esa solución, lo lavábamos en agua y recogimos minuciosamente todas las moléculas que se habían adherido a caras determinadas del cristal. Una y otra vez observamos que las caras "levógiras" de la calcita seleccionaban aminoácidos L y viceversa, con desproporciones que llegaban en algunos casos al 40 %.

Era curioso que las caras de calcita con superficies escalonadas fueran las que mostrasen una ma-



3. MOSCOVITA, un mineral estratificado que pudo servir de armadura de sostén para el desarrollo de moléculas de complejidad creciente.

El poder de los cristales

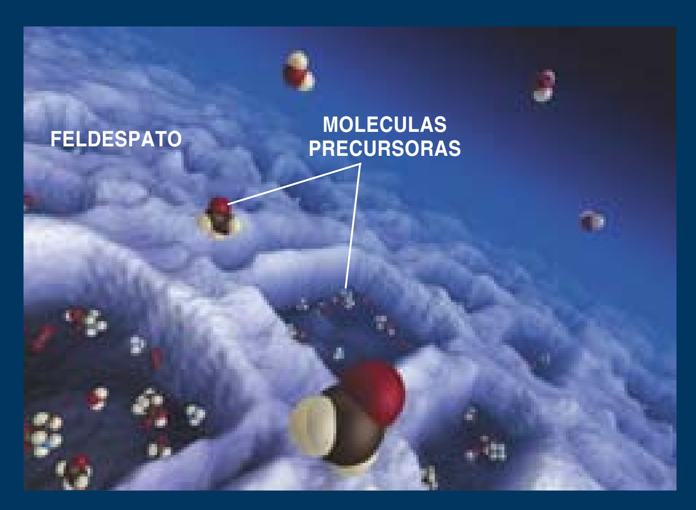
Nada más inanimado que las piedras. ¿Cómo podrían haber contribuido las rocas —o los minerales que las constituyen— a la aparición de la vida? La respuesta está en la química. A partir de moléculas sencillas, los minerales adquieren estructuras ordenadas mediante reacciones químicas. Por la misma razón, todos los seres vivos —de las bacterias a los murciélagos— deben su capacidad de crecer y la ejecución de sus funciones a los cientos de reacciones químicas que se producen en el interior celular.

Hace cuatro mil millones de años no había vida en la Tierra: la química, no la biología, transformó la superficie del planeta. En aquellos tiempos remotos los minerales —junto con los océanos y la atmósfera— eran las únicas materias primas disponibles. Las reacciones químicas, pues, hubieron de dar los primeros pasos en los orígenes de la vida. Una secuencia de transformaciones químicas podría haber reconfigurado los componentes más simples del aire, del agua y las rocas en conjuntos primitivos de moléculas con esqueleto de carbono, capacitadas para replicarse a sí mismas.

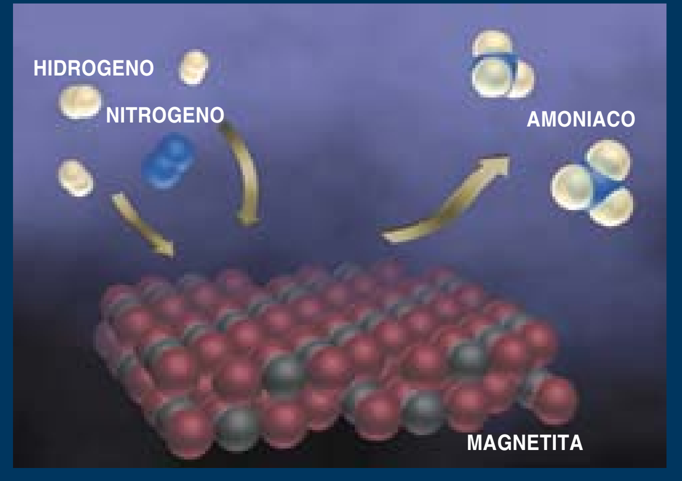
Nuevos experimentos están descubriendo que seguramente no hubieran sido posibles las transformaciones fundamentales sin la ayuda de minerales que hicieron de recipientes, moldes, catalizadores y reactivos.



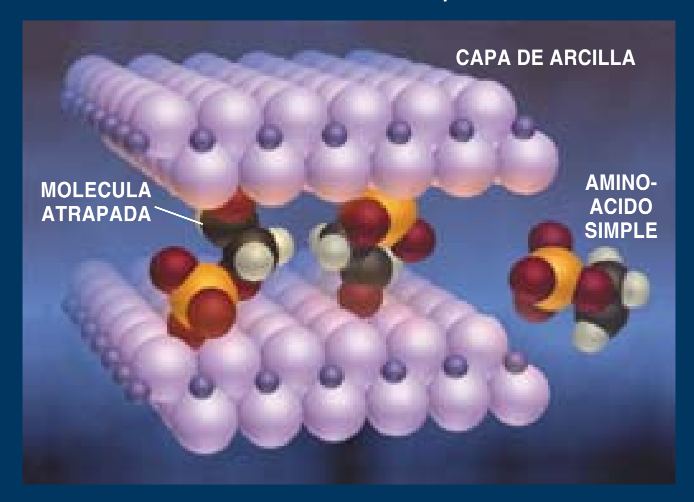
MOLDES. El mineral calcita atrae los aminoácidos levógiros y dextrógiros hacia caras diferentes del cristal. Este proceso de clasificación podría explicar por qué las moléculas biológicas son levógiras.



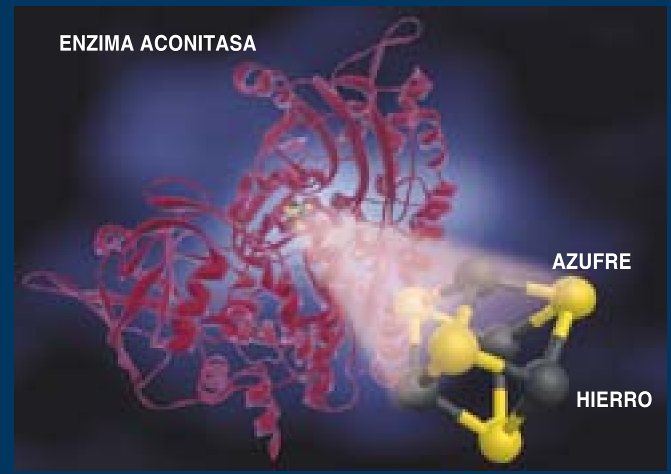
RECIPIENTES. En las superficies erosionadas del feldespato y de otros minerales comunes aparecen abundantes hoyuelos microscópicos. Esas cámaras minúsculas podrían haber protegido de las radiaciones letales a las moléculas precursoras de la vida.



CATALIZADORES. La magnetita, un mineral de óxido de hierro, puede desencadenar la recombinación del nitrógeno y el hidrógeno gaseosos en amoníaco, el grupo químico esencial del que obtienen nitrógeno las células.



ANDAMIOS. Los minerales estratificados, las arcillas, por ejemplo, pueden atrapar moléculas orgánicas errantes entre sus rígidas capas de átomos. Mantenidas cerca unas de otras, las moléculas simples pueden reaccionar y formar complejos.



REACTIVOS. El hierro y el azufre, los elementos que forman el centro activo de ciertas enzimas como la aconitasa, pueden liberarse por disolución, bajo temperaturas y presiones extremas, de minerales de sulfuro de hierro.



4. EN LA CALCITA encontramos un mineral adecuado para explicar la quiralidad de ciertas moléculas biológicas. La estructura química de la calcita de las conchas de muchos moluscos se enlaza fuertemente con aminoácidos. Es posible incluso que en los comienzos de la historia de la Tierra se formase una proteína autorreproductora en la cara de un cristal de calcita.

yor selectividad. Este resultado nos hizo conjeturar que esos bordes escalonados forzaban a los aminoácidos L y D a alinearse en filas bien definidas sobre sus respectivas caras. En unas circunstancias ambientales correctas, esas filas organizadas de aminoácidos podrían unirse químicamente y formar moléculas similares a las proteínas, unas hechas de aminoácidos L, otras sólo con los D. Si realmente se produjesen proteínas, este resultado sería aún más apasionante; los experimentos recientes de otros investigadores indican que hay proteínas capaces de autorreplicarse. Es posible que en los comienzos de la historia de la Tierra se formase una proteína autorreproductora en la cara de un cristal de calcita.

Hay más o menos un mismo número de caras levógiras y dextrógiras de cristales; por eso la selección quiral de los aminoácidos L no se produciría de golpe en todas partes. De acuerdo con nuestros resultados y predicciones, el primer conjunto de moléculas autorreproductoras —precursor de todas las diversas formas de vida que hay hoy en la Tierra— cuajó en un instante y un lugar concretos. Fue una pura casualidad que la molécula que tuvo suerte se desarrollase en una cara cristalina que seleccionara de preferencia aminoácidos levógiros.

No cabe duda de que ciertos minerales pudieron hacer de recipientes, de andamios y de moldes, y así contribuir a la selección y organización de la miríada de moléculas de la Tierra primitiva. Pero los minerales podrían haber desempeñado una función más activa y catalizar ciertas reacciones de síntesis que acrecentaron el primer muestrario de moléculas biológicas complejas.

Síntesis de Fischer-Tropsch

Los experimentos que Brandes realizó en 1997 ilustran esa posibilidad. Para las reacciones biológicas el nitrógeno debe hallarse en forma amoniacal, pero en la Tierra primitiva no habría más compuesto común de nitrógeno que el nitrógeno molecular. Pensó Brandes que en el entorno de las fumarolas hidrotermales podría darse algo parecido al proceso industrial donde se sintetiza amoníaco haciendo pasar nitrógeno e hidrógeno sobre una superficie metálica caliente. Como esperábamos, cuando sometimos hidrógeno, nitrógeno y magnetita, mineral de óxido de hierro, a las presiones y temperaturas propias de una fumarola del suelo oceánico, el mineral catalizó la síntesis de amoníaco.

La idea de que los minerales quizá desencadenaron los primeros y cruciales pasos de la vida ha irrumpido con gran fuerza gracias a la teoría de Günther Wächtershäuser. En 1988 propuso que los minerales —sobre todo los sulfuros de hierro y de níquel que abundaban en las fumarolas hidrotermales de las profundidades del mar— eran los moldes, catalizadores y fuentes de energía que impulsaron la formación de las moléculas biológicas. Los seres vivos primitivos serían estratos moleculares que se adherían a las superficies de carga positiva de la pirita, mineral compuesto de hierro y azufre. Esos seres extraían energía de las reacciones químicas que producen pirita. Esta hipótesis tiene sentido en parte porque algunas enzimas metabólicas —las moléculas que ayudan a las células a procesar la energía— tienen en su núcleo un cúmulo de átomos metálicos y de azufre.

Durante buena parte de los últimos tres años la estimulante teoría de Wächtershäuser ha influido en nuestros experimentos de la Carnegie. Nuestro equipo, que cuenta con el geoquímico George Cody y

el petrólogo Hatten S. Yoder, se ha centrado en la posibilidad de que el metabolismo pueda realizarse, sin enzimas, en presencia de minerales (óxidos y sulfuros sobre todo). Nuestra sencilla estrategia, en línea con la simplicidad experimental de Miller, consiste en someter unos ingredientes de los que se sabe que la Tierra joven disponía —agua, dióxido de carbono y minerales— a un entorno controlado. En nuestro caso, intentamos reproducir las presiones aplastantes y las temperaturas abrasadoras de una fumarola hidrotermal oceánica. La mayoría de nuestros experimentos examinan las relaciones entre ingredientes encerrados en cápsulas de oro selladas del tamaño de una píldora vitamínica. Ponemos seis cápsulas en la "bomba" de Yoder, una cámara de acero presurizada que somete las cápsulas a una presión de casi 2000 atmósferas y a una temperatura de unos 250 grados C.

Nos proponemos en estos experimentos de síntesis orgánica un objetivo principal, que es a la vez una de las reacciones químicas fundamentales de la vida: la fijación del carbono, o producción de moléculas con un número creciente de átomos de carbono en su estructura química. Esas reacciones siguen dos caminos diferentes, según el mineral que usemos. Muchos minerales comunes, incluidos la mayoría de los óxidos y sulfuros de hierro, cobre y cinc, promueven la adición de carbonos por medio de un proceso industrial corriente, la síntesis de Fischer-Tropsch (F-T).

Mediante la técnica F-T se obtienen moléculas orgánicas con estructura de cadena a partir del monóxido de carbono y del hidrógeno. Este y aquél reaccionan primero y forman metano, que tiene sólo un átomo de carbono. Añadir más monóxido de carbono e hidrógeno al metano produce etano, molécula con dos carbonos, y la reacción se va repitiendo, añadiendo un átomo de carbono cada vez. Industrialmente se controla esta reacción para fabricar moléculas con casi cualquier número de carbonos que se desee. Nuestros primeros experimentos de síntesis orgánica, en 1996, y las investigaciones mucho más amplias de Thomas McCollom, de la Institución Oceanográfica de Woods Hole, demostraron que las reacciones F-T pueden sintetizar, en menos de un día, moléculas con 30 átomos de carbono o más en condiciones similares a las de las fuentes hidrotermales oceánicas en menos de un día. Si este proceso fabrica moléculas orgánicas grandes en las zonas hidrotermales que hay hoy en el mundo, es muy probable que lo hiciera también en el pasado prebiológico del planeta.

Cuando empleamos sulfuros de níquel o de cobalto, vemos que la adición de carbono se produce por carbonilación, que es la inserción de una molécula de carbono y oxígeno, o grupo carbonilo. Los grupos carbonilos se unen fácilmente a los átomos de níquel o cobalto, pero no con tanta fuerza que no puedan enlazarse con otras moléculas para formar moléculas mayores. Observamos en una serie de experimentos cómo se alargaba la molécula de nonanetiol, con nueve átomos de carbono, y se convertía en ácido decanoico, de 10 átomos de carbono, un compuesto similar a los ácidos orgánicos que alimentan las reacciones metabólicas en las células. Más aún, todos los componentes de la reacción experimental —un tiol, el monóxido de carbono y el agua— abundan cerca de las fumarolas hidrotermales ricas en sulfuros. Mediante la repetición de estos tipos simples de reacciones —añadir un grupo carbonilo aquí o uno hidroxilo allá— podemos sintetizar una rica variedad de moléculas orgánicas complejas.

Nuestros más de 1500 experimentos de síntesis orgánicas hidrotermales de la Carnegie han hecho algo más que ampliar el catálogo de moléculas interesantes que debieron de producirse en la Tierra primitiva. Han descubierto un comportamiento diferente y más complejo de los minerales que quizá tuviese consecuencias importantes para la química de la vida. Para la mayoría de los estudios que se habían hecho antes acerca de los orígenes de la vida, los minerales eran sólidos e inalterables, plataformas estables donde podían ensamblarse las moléculas orgánicas. Pero hemos obtenido que en presencia de agua caliente a alta presión los minerales empiezan a disolverse, y así los átomos y moléculas liberados de los minerales pueden convertirse en reactivos cruciales de la sopa primigenia.

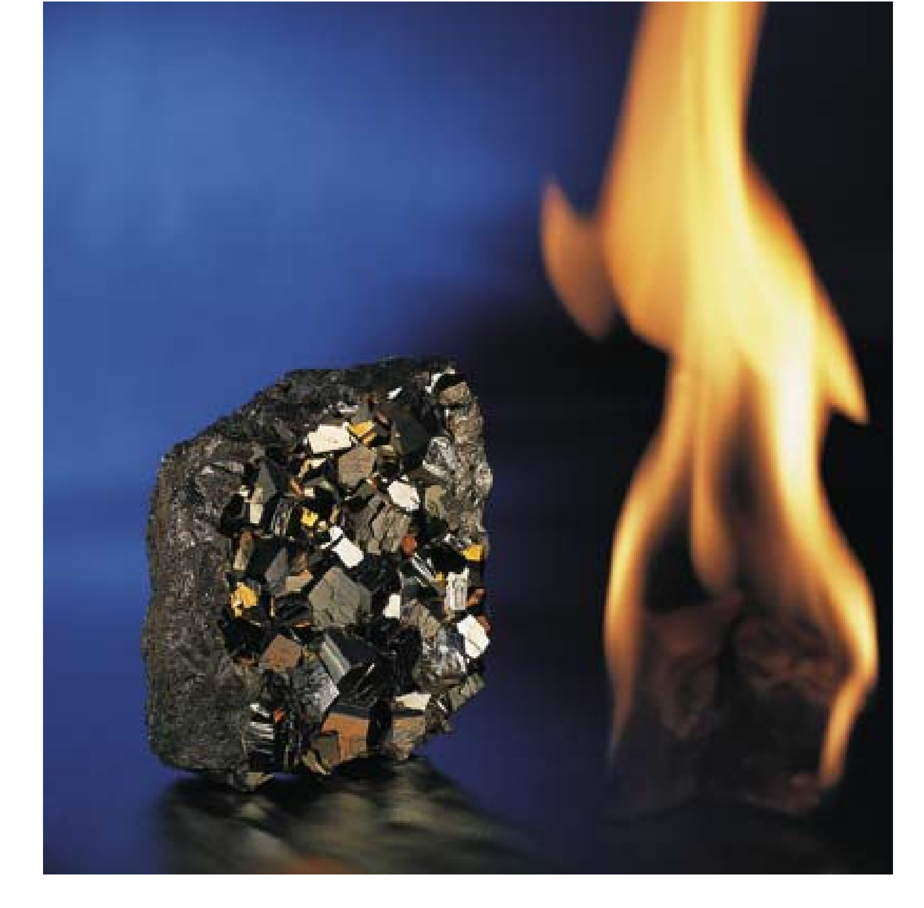
El nudo de la cuestión

Habíamos realizado ese descubrimiento inesperado de la función reactiva de los minerales en el curso de una serie reciente de experimentos de catálisis, dirigidos por Cody. De acuerdo con lo previsto, las reacciones de carbonilación produjeron ácido decanoico, a partir de una mezcla de moléculas simples guardadas en nuestras cápsulas de oro. Pero aparecieron también cantidades de azufre elemental, sulfuros orgánicos, metiltiol y otros compuestos de azufre. El azufre de todos estos productos tuvo que liberarse del mineral de sulfuro de hierro.

Más impresionante aún fue que se liberase hierro, que coloreó brillantemente las soluciones acuosas dentro de las cápsulas. Cuando el mineral se disolvió, el hierro formó complejos organometálicos naran-



5. LA MAGNETITA, mineral de óxido de hierro, pudo catalizar reacciones bioquímicas en ausencia de enzimas. En el laboratorio del autor, al someter hidrógeno, nitrógeno y magnetita a las presiones y temperaturas propias de una fumarola del suelo oceánico, el mineral catalizó la síntesis de amoníaco.



6. DE LA PIRITA, mineral compuesto de hierro y azufre, pudo extraerse la energía necesaria para determinadas reacciones bioquímicas en los primeros procesos de la vida. Se supone que las "entidades vivas primitivas" serían estratos moleculares que se adherían a las superficies de carga positiva de la pirita. Esta hipótesis tiene sentido en parte porque algunas enzimas metabólicas —las moléculas que ayudan a las células a procesar la energía— tienen en su núcleo un cúmulo de átomos metálicos y de azufre.

jas y rojos en los que los átomos de hierro están rodeados por varias moléculas orgánicas. Estamos investigando ahora en qué medida esos complejos potencialmente reactivos podrían actuar como enzimas que promuevan la síntesis de estructuras moleculares.

Que los minerales sean ingredientes químicos esenciales de la vida no es del todo inesperado. Es bien sabido que los fluidos hidrotermales disuelven y concentran minerales. En los humeros oceánicos crecen espectaculares columnas de sulfuro de varios metros de altura a medida que los penachos de agua caliente cargada de minerales emergen del subsuelo marino, entran en contacto con el agua gélida de la profundidad del océano y se van depositando nuevas capas de minerales sobre la columna creciente. Pero el papel de estos minerales disueltos no ha contado apenas aún en los guiones sobre los orígenes de la vida. Sea cual sea su comportamiento, parece que los minerales disueltos hacen que la historia de la aparición de la vida sea mucho más interesante.

Cuando miramos más allá de los aspectos específicos de la química prebiológica, se hace evidente que el origen de la vida fue demasiado complejo para reducirlo a un solo episodio. Antes bien, hemos de partir de la idea de que hubo una secuencia gradual de sucesos modestos, cada uno de los cuales añadía orden y complejidad al mundo de las moléculas prebiológicas. El primer paso debió ser la síntesis de los ladrillos básicos. Medio siglo de investigación ha descubierto que las moléculas de la vida se produjeron en abundancia, en la nebulosa de la que salió nuestro sistema solar, sobre la superficie del océano y cerca de las chimeneas hidrotermales. La Tierra primigenia creó una diversidad de moléculas muy superior a la que la vida podía emplear.

Los minerales ayudaron a poner orden en ese caos. Al confinar y concentrar primero las moléculas, con su ulterior selección y organización de las mismas, los minerales pondrían en juego los primeros sistemas moleculares autorreplicantes. Tales sistemas no serían vida en el sentido genuino del término, pero es posible que tuvieran, por vez primera, una propiedad clave de la vida.

En ese marco, un sistema molecular autorreproductivo empezó a utilizar los recursos de su entorno. Cuando las mutaciones llevaron a variantes un poco diferentes, la competencia por los recursos limitados impulsó la selección molecular natural. Los sistemas moleculares autorreplicantes empezaron a evolucionar y de manera inevitable se volvieron más eficientes y complejos.

Un objetivo a largo plazo de nuestros trabajos en la Institución Carnegie es el de iterar pasos químicos simples que puedan llevar hasta un sistema autorreproductor, quizá relacionado con los ciclos metabólicos comunes a todas las células. Se está muy lejos de crear vida en el laboratorio, y quizá no conozcamos nunca qué transformaciones químicas fueron las que trajeron la vida en la Tierra. De lo que sí podemos estar seguros es de que los minerales desempeñaron un papel mucho más complejo e imprescindible en el origen de la vida de lo que se había pensado. Al conceder a los minerales papeles de protagonistas en los experimentos que abordan los principios de la vida, quizá nos estemos acercando a la respuesta de una de las preguntas más antiguas de la ciencia.

Bibliografía complementaria

BEGINNINGS OF CELLULAR LIFE. Harold J. Morowitz. Yale University Press, 1992.

ORIGINS OF LIFE: THE CENTRAL CONCEPTS. David D. Deamer y Gail R. Fleischaker. Jones and Bartlett, 1994.

EMERGENCE: FROM CHAOS TO ORDER. John H. Holland. Helix Books, 1998.

BIOGENESIS: THEORIES OF LIFE ORIGIN. Noam Lavah. Oxford University Press, 1999.

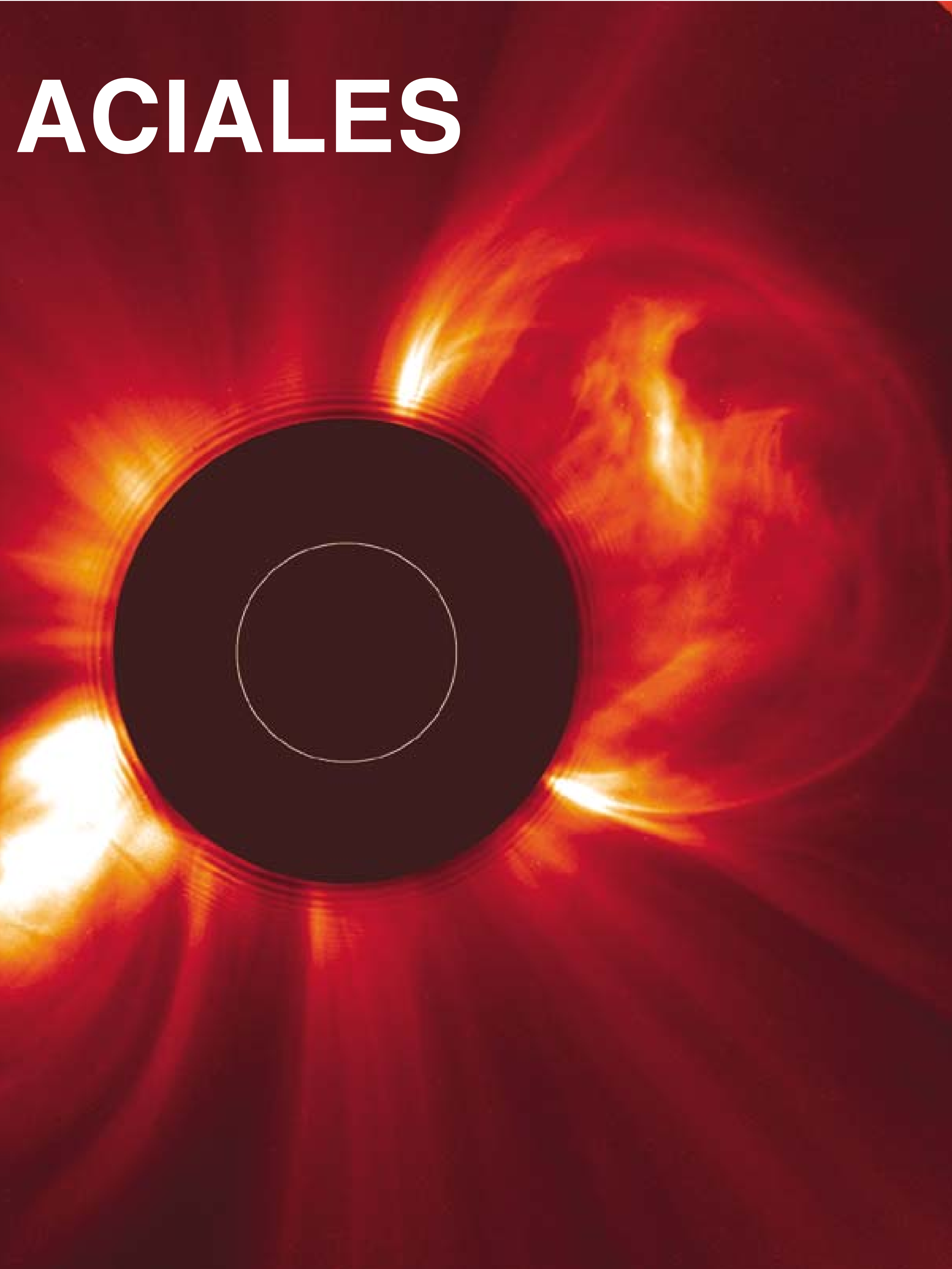
TORMENTAS ESP

Las ondas de choque del Sol pueden desencadenar grandes turbulencias en el espacio que rodea la Tierra, poniendo en peligro la integridad de los satélites y los astronautas. Una nueva sonda estudia la evolución dinámica de las tormentas espaciales

James L. Burch

La tempestad comenzó en una fecha recordada por sucesos violentos de otra índole: el día en que se conmemora la toma de la Bastilla, detonante de la Revolución francesa. En la mañana del 14 de julio de 2000, el Centro del Medio Espacial en Boulder, Colorado, recibió una señal de aviso procedente del satélite GOES-8, que realiza un seguimiento de los rayos X del Sol así como de las condiciones climáticas en la Tierra. A las 10:03 de tiempo universal (TU) los investigadores observaron un pico muy brillante en la intensidad de los rayos X provenientes de la región activa 9077, una zona de la superficie solar que se había mostrado agitada desde hacía una semana. Los datos indicaban el comienzo de una fulguración solar, un corto y potente estallido de radiación.

1. ERUPCION VIOLENTA de la atmósfera más externa del Sol, acontecida el 8 de noviembre de 2000. Expulsó miles de millones de toneladas de partículas cargadas hacia la Tierra. El Observatorio Heliosférico Solar (SOHO) recogió el episodio; el coronógrafo de la sonda utiliza un disco (*círculo oscuro*) para bloquear la luz directa del Sol (*círculo blanco*), de suerte que deje visible la atmósfera solar.


ACIALES

La fulguración alcanzó su máxima intensidad a las 10:24 TU. Lo percibió también el Observatorio Heliosférico Solar (SOHO), un satélite estacionado entre el Sol y la Tierra, a unos 1,5 millones de kilómetros de nuestro planeta. Media hora más tarde, tal y como la fulguración avisaba, SOHO detectó algo mucho más amenazador: una nube brillante que se expandía y envolvía al Sol como un halo. Se trataba de una eyección de masa coronal (EMC), una erupción en la corona —la atmósfera externa del Sol— que arrojaba al espacio interplanetario miles de millones de toneladas de partículas cargadas de electricidad. El aspecto del halo indicaba que las partículas se dirigían hacia la Tierra, a una velocidad estimada de 1700 kilómetros por segundo.

A medida que la EMC se mezclaba con el viento solar —la corriente de gas ionizado que continuamente emana del Sol—, se creó una onda de choque que aceleró algunas partículas cargadas. En menos de una hora, un diluvio de protones de alta energía cayó sobre SOHO, dejando sus instrumentos ciegos por un tiempo. El bombardeo dañó también los paneles solares del satélite, causando en sólo 24 horas un deterioro que, en condiciones normales, equivaldría al de un año. Pero semejante torrente de partículas era sólo la avanzadilla. La onda de choque originada por la EMC nos llegó al día siguiente, introduciéndose en el campo magnético de la Tierra a las 14:37 TU. El impacto señaló el comienzo de una gran tormenta geomagnética, cuya furia se desataría con la llegada de la propia EMC, pocas horas después. Según los índices de actividad geomagnética utilizados por el Centro del Medio Espacial, la tormenta del día de la toma de la Bastilla constituyó la más intensa en casi un decenio.

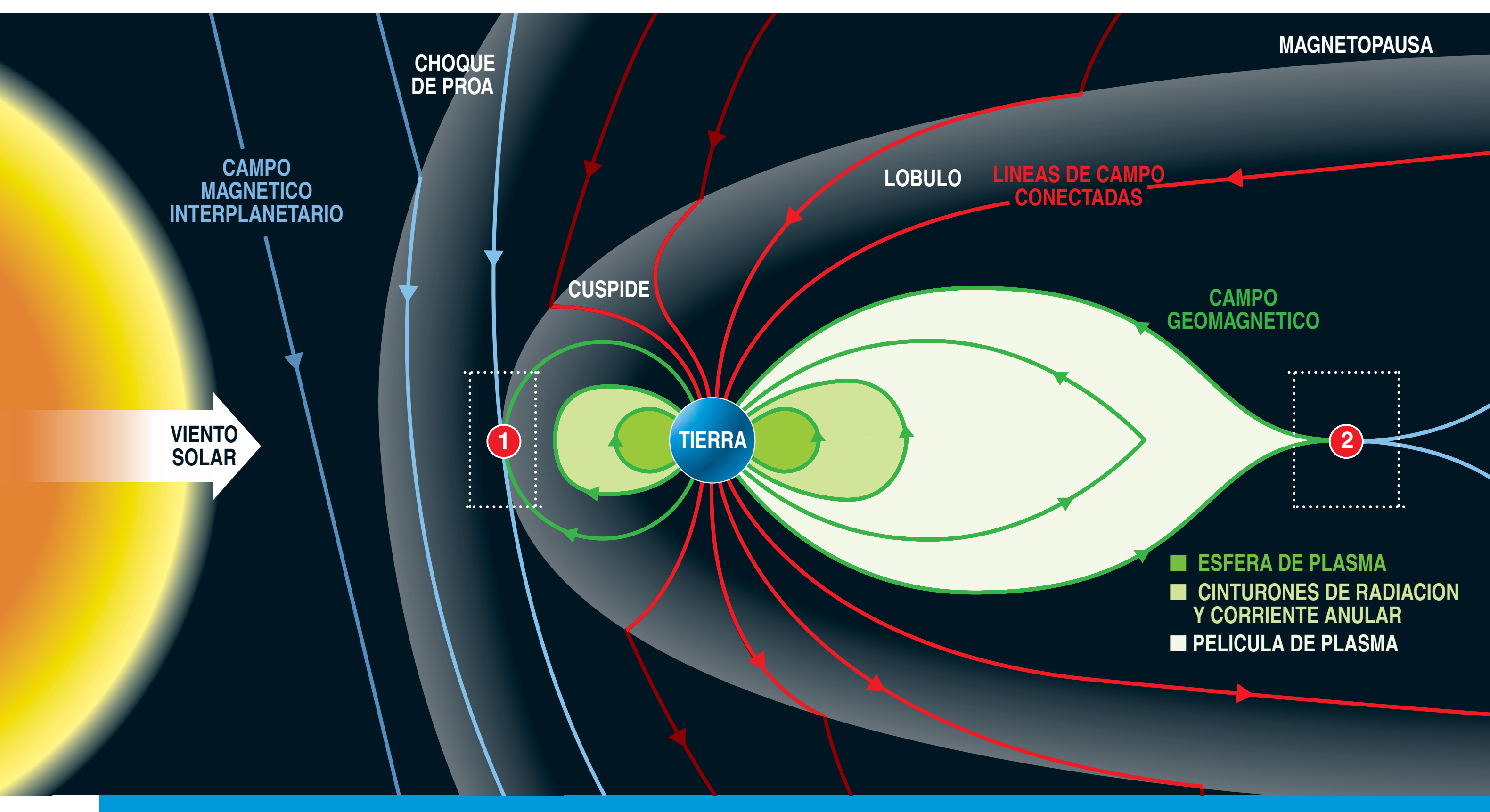
Los fuegos artificiales del firmamento pasaron inadvertidos para el común de la gente, pero los investigadores siguieron la tempestad con todo detalle, recogiendo datos con instrumentos instalados en la superficie y en el espacio. Entre los satélites atentos al desarrollo de la tormenta destacó el que explora la transición de magnetopausa a aurora (“Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration”, o IMAGE), lanzado cuatro meses antes por la Agencia Norteamericana para la Aeronáutica y el Espacio (NASA). Se trata del primer satélite dedicado a fotografiar la magnetosfera, la región del espacio cubierta por el campo magnético de la Tierra. Al facilitar imágenes globales de la actividad en la magnetosfera, IMAGE realiza en el espacio lo mismo que los primeros satélites meteorológicos hicieron en la atmósfera de la Tierra.

En 1996 me encargó la NASA dirigir a un equipo de ingenieros y científicos para diseñar el satélite IMAGE y analizar los datos que remitiera. En el curso del desarrollo de la tormenta del 14 de julio, recibíamos imágenes sorprendentes de masas de iones que rodeaban la Tierra y fotografías de brillantes auroras boreales —las luces del norte— que aparecían cuando las partículas cargadas chocaban contra la alta atmósfera. Los resultados facilitaron la respuesta de numerosas cuestiones que plantea la interacción de la EMC y el viento solar con la magnetosfera terrestre. Las conclusiones podrían incluso tener aplicaciones prácticas. Las tormentas espaciales pueden dejar fuera de servicio a los satélites, amenazar la seguridad de los astronautas y bloquear incluso las redes de suministro eléctrico. Por culpa de la tormenta del 14 de julio se perdió el Satélite Avanzado para Cosmología y Astrofísica, un observatorio de rayos X lanzado en 1993 por la agencia japonesa de investigación espacial. Con la esperanza de mitigar los efectos de futuras tormentas, se está mejorando la fiabilidad de las “predicciones meteorológicas” en el espacio.

LOS EFECTOS DE LAS TORMENTAS DEL ESPACIO

DURANTE LAS TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS, las partículas cargadas se revuelven en torno a la Tierra bombardeando las capas superiores de la atmósfera, en particular las latitudes más altas. Los chorros de partículas pueden tener efectos notables en:

- REDES ELÉCTRICAS. A medida que los electrones caen en cascada hacia la Tierra, generan una intensa corriente en las capas superiores de la atmósfera. Ese electrochorro auroral, así se llama la corriente, genera fluctuaciones en el campo geomagnético que inducen sobrecargas en el tendido eléctrico. Durante la fuerte tormenta geomagnética del 13 de marzo de 1989, una crecida eléctrica bloqueó la red de distribución de Hydro-Quebec, dejando grandes áreas de Canadá en la oscuridad.
- SATÉLITES. Cuando las partículas golpean a un satélite, la superficie de la sonda se carga con electricidad. Esta carga origina en ocasiones chispas que pueden cortocircuitar la electrónica del satélite. También, las tormentas espaciales calientan la atmósfera de la Tierra aumentándola de tamaño. Si la densidad atmosférica en la órbita de un satélite adquiere cierta magnitud, la fricción provocará que el satélite se frene y comience a caer. Por ese proceso se produjo la caída prematura del Skylab en 1979.
- ASTRONAUTAS. Una tormenta de cierta intensidad podría exponer la Estación Espacial Internacional a protones que serían capaces de penetrar en el traje espacial o incluso atravesar las paredes de la estación. Para cuidar de sus astronautas la NASA hace un seguimiento del clima espacial. Si una tormenta que se acerca conlleva algún riesgo, la NASA retrasará o cancelará cualquier paseo espacial programado y, si preciso fuera, ordenarles que se refugiaran en la zona escudada de la estación.



2. SE PRODUCEN PERTURBACIONES DE LA MAGNETOSFERA cuando el campo magnético interplanetario, transportado por el viento solar, gira hacia el sur. En un proceso de reconexión, las líneas de fuerza del campo magnético interplanetario se conectan con las líneas de fuerza del campo geomagnético de componente norte en la cara diurna de la magnetopausa (*1*). La energía y las partículas del viento solar entran en la magnetosfera, agrandando sus lóbulos norte y sur y estrechando la película de plasma. Luego, las líneas del campo geomagnético se reconectan con ellas mismas (*2*), acelerando los iones y los electrones hacia la Tierra.

Sin calor ni humedad

Lo mismo que en la Tierra, el clima del espacio es muy variable. Se puede pasar de la tranquilidad a la tormenta en apenas unos minutos, y los huracanes pueden durar horas o días. Y, al igual que el clima de la Tierra cambia con las estaciones, el clima espacial sigue también sus propios ciclos. La actividad magnética solar, que es la fuente de las fulguraciones y de EMC, crece y disminuye con un período de 11 años; por tanto, las tormentas geomagnéticas reflejan ese patrón. La tormenta del día de la Bastilla aconteció durante un máximo solar, el intervalo más activo del ciclo. El clima del espacio también varía, si bien menos drásticamente, con el período de rotación del Sol, de 27 días, conforme las corrientes de viento solar rápido y lento, alternas, barren la Tierra.

El clima espacial, sin embargo, tiene su raíz en procesos físicos que son muy distintos de los responsables de la meteorología terrestre. El medio en el que evoluciona nuestro clima es un gas denso, eléctricamente neutro de las capas bajas de la atmósfera, cuyo comportamiento está gobernado por las leyes de la dinámica de fluidos y la termodinámica. El medio del clima espacial es, por el contrario, un plasma: gases muy dispersos constituidos por un número igual de iones dotados de carga positiva y electrones negativos. A diferencia de lo que les ocurre a los átomos y moléculas de la atmósfera terrestre, las partículas del plasma están sujetas a la influencia de campos eléctricos y magnéticos, que guían y aceleran las partículas en su recorrido por el espacio en torno a la Tierra.

El tiempo meteorológico terrestre viene regulado por la radiación solar, que calienta la atmósfera, los océanos y los continentes. En la magnetosfera, sin embargo, las condiciones meteorológicas derivan de la interacción entre el campo magnético terrestre y el viento solar. Presenta este último su propio campo magnético, que se propaga con el plasma eyectado, hacia el espacio interplanetario. A medida que el viento solar transporta este campo magnético interplanetario (CMI), sus líneas de fuerza se abren de tal forma, que se dirigen radialmente (apuntando hacia el Sol o en sentido opuesto). Bajo ciertas circunstancias, no

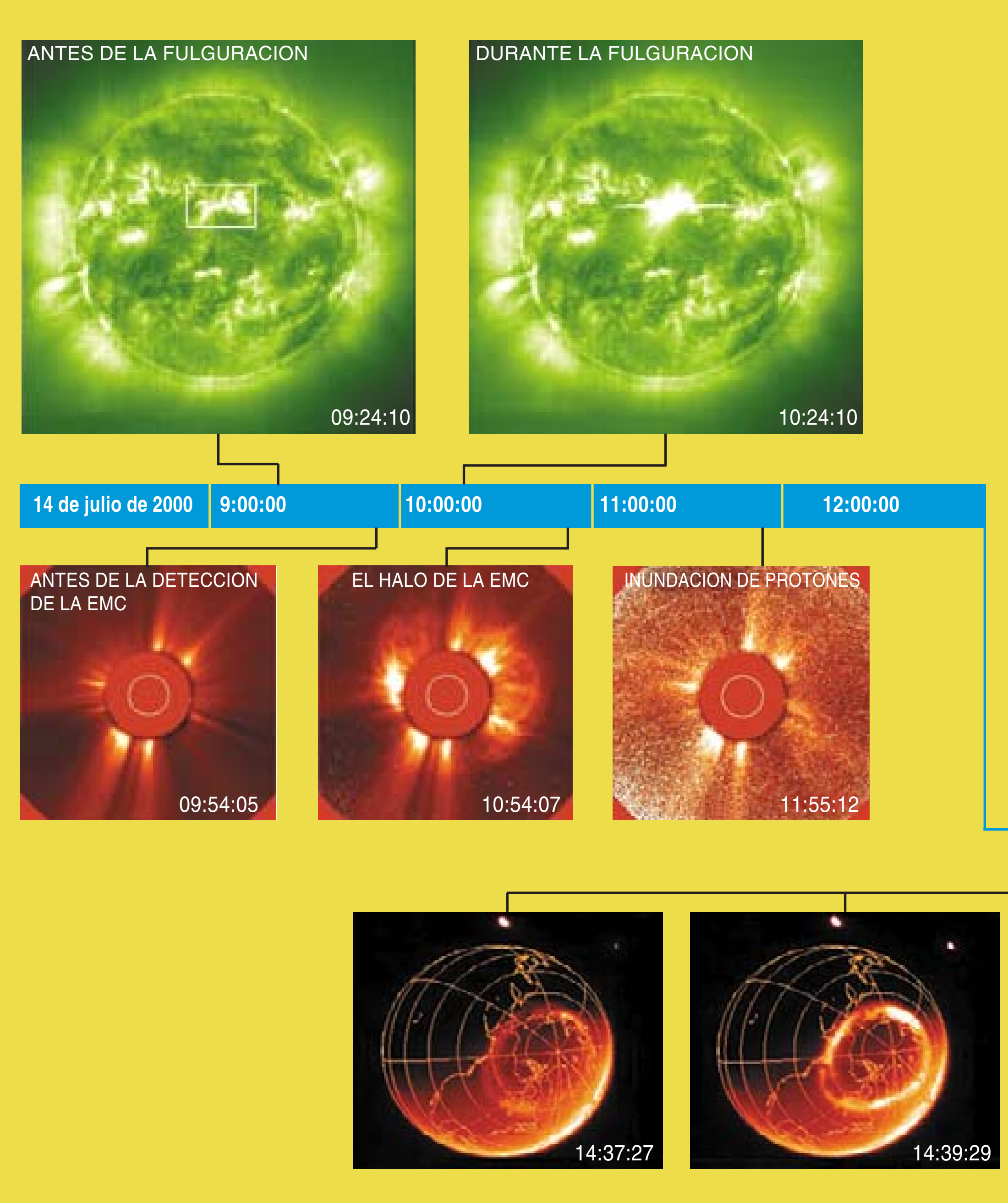
obstante, las líneas de fuerza del CMI pueden desviarse del plano ecuatorial del Sol y adoptar una componente norte o sur. Para desencadenar tormentas geomagnéticas resulta clave una dirección del CMI muy marcada hacia el sur. El campo magnético interplanetario persistió orientado hacia el sur durante bastantes horas en la tormenta del 14 de julio.

Los protones son los constituyentes principales del viento solar; dan cuenta de casi el 80 % de su masa total. Los núcleos de helio representan el 18 % y hay cantidades menores de iones pesados. La densidad media del viento solar en la órbita de la Tierra es de nueve protones por centímetro cúbico. La velocidad promedio del viento se cifra en 470 kilómetros por segundo; la intensidad media del campo magnético interplanetario es de seis nanotesla (aproximadamente un quinto de la milésima parte de la intensidad del campo magnético de la Tierra en la superficie del planeta). Estas propiedades, junto con la orientación del CMI, son muy variables, variabilidad responsable, en última instancia, de los cambios climáticos en el espacio.

Todos los cuerpos del sistema solar se hallan inmersos en el viento solar, que continúa fluyendo hacia el exterior hasta que tropieza con los gases ionizados y neutros del espacio interestelar. Pero el viento solar no impacta directamente sobre la Tierra y su atmósfera, porque las protege el campo magnético terrestre, formando una suerte de burbuja en el interior de la corriente de partículas cargadas que emanan del Sol. La estructura de esta cavidad —la magnetosfera— viene fijada por la presión del viento solar y por el CMI (*véase la figura 2*). El viento comprime el campo magnético de la Tierra en la

ASI SE DESARROLLA UNA TORMENTA ESPACIAL

El primer aviso de la tormenta del 14 de julio de 2000 fue una fulguración solar. Las imágenes del Sol tomadas con el telescopio de ultravioleta extremo de SOHO (*arriba*) muestran la región activa número 9077 (*en recuadro blanco*) antes y durante la fulguración. Aproximadamente al mismo tiempo, el coronógrafo de SOHO observó una eyección de materia coronal (EMC), que pronto inundó el satélite con protones de alta velocidad, cegando momentáneamente los instrumentos a bordo (*centro*). La onda de choque y la EMC alcanzaron el campo magnético de la Tierra al día siguiente, desencadenando auroras que fueron detectadas por la cámara de banda ancha del satélite IMAGE (*abajo*) y originando una caída rápida de la intensidad del campo geomagnético en la superficie del planeta. En esta figura, llamada índice temporal de la perturbación tormentosa, el cero representa la intensidad normal del campo en la superficie. A medida que la tormenta evolucionaba, el sensor de átomos neutros de alta energía de IMAGE controlaba las crecidas y bajadas de la corriente anular alrededor del ecuador de la Tierra (*página contigua, arriba*).

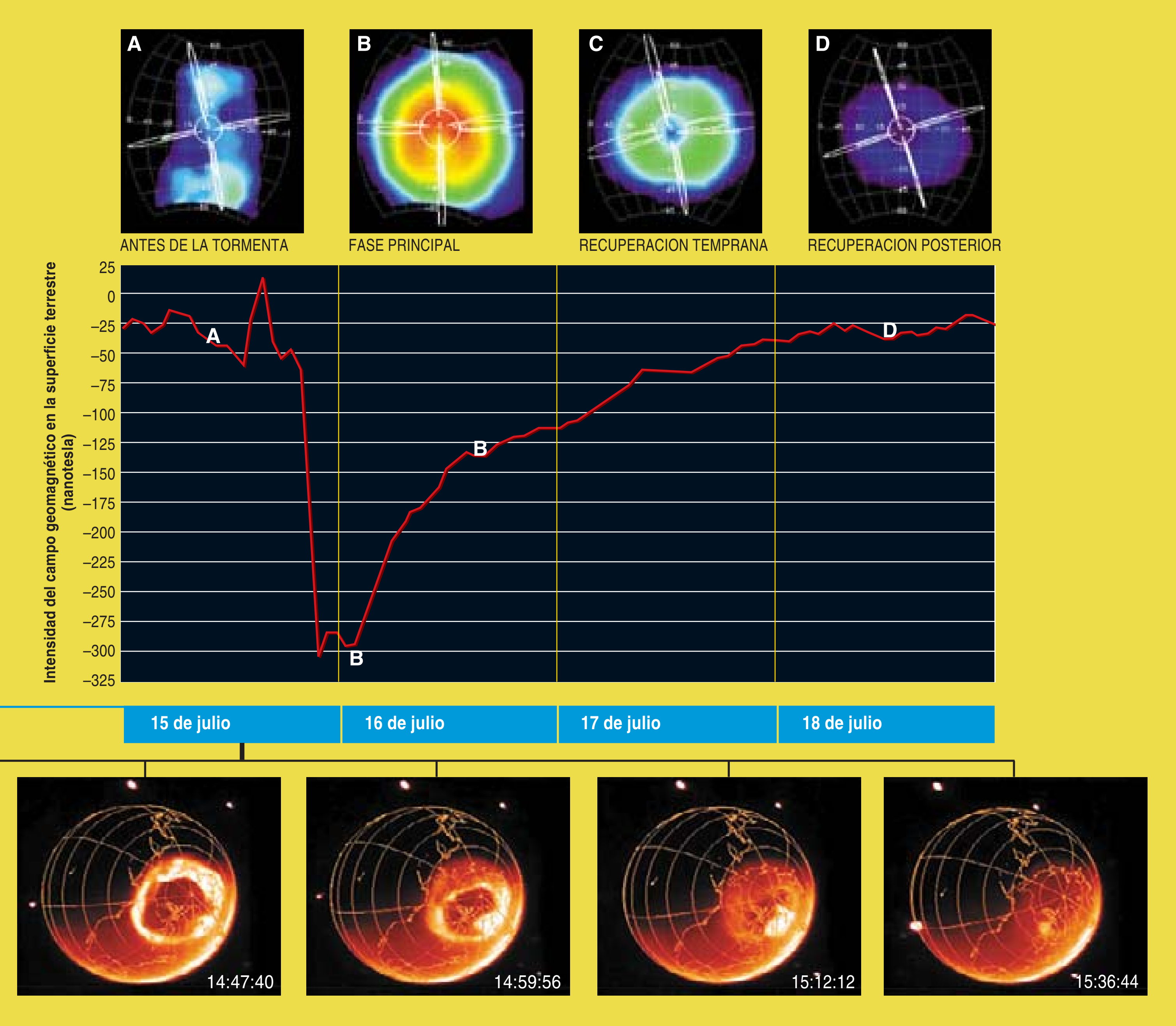


cara diurna del planeta —la cara iluminada por el Sol— y estira el campo en la cara nocturna hasta dibujar una cola parecida a la de un cometa. Esta cola magnética se extiende más de un millón de kilómetros allende la Tierra, trascendiendo la órbita de la Luna.

Entre el viento solar y la magnetosfera encontramos una frontera sutil, la magnetopausa, donde la presión del campo geomagnético compensa la presión del viento. En la cara diurna terrestre, esta frontera suele hallarse a unos 64.000 kilómetros del centro del planeta, aunque la distancia varía con los cambios de la presión del viento solar. Cuando la presión aumenta, como ocurrió durante la tormenta del día de la Bastilla, la magnetopausa de la cara diurna se sitúa más cerca de la superficie de la Tierra, en algunas ocasiones a sólo 26.000 kilómetros.

Lo mismo que el paso de un avión supersónico a través de la atmósfera produce una onda de choque, el encuentro del viento solar con la magnetosfera también origina una onda similar —conocida como choque de proa— a unos 13.000 kilómetros corriente arriba (esto es, más cerca del Sol) de la cara diurna de la magnetopausa. La región de plasma del viento solar entre el choque de proa y la magnetopausa se denomina envolvente de la magnetosfera. Como consecuencia de su paso a través del choque, el plasma en la envolvente es más lento, más caliente y más turbulento que el plasma situado corriente arriba.

Los detectores del satélite indicaron que las partículas cargadas que rodean la Tierra son una mezcla del plasma de la envolvente (principalmente protones) y del plasma que fluye desde las capas altas



de la atmósfera de los polos norte y sur (protones y iones de oxígeno, sobre todo). Las proporciones de esta mezcla varían según que la magnetosfera se halle en un estado tranquilo o perturbado. Durante las tormentas geomagnéticas, las partículas cargadas bombardean la Tierra en altas latitudes. Las corrientes eléctricas resultantes calientan las capas superiores de la atmósfera, bombeando cantidades crecientes de protones y iones de oxígeno hacia la magnetosfera. Este plasma queda confinado, junto con el plasma del viento solar que acaba de entrar en la magnetosfera, formando una gran reserva llamada película de plasma, que se extiende decenas de miles de kilómetros en la cara nocturna de la Tierra.

Soplando en el viento solar

El problema central del estudio del clima espacial se compendia en la pregunta: ¿de qué modo influyen los cambios del viento solar en las condiciones del espacio que ciñe a la Tierra? En otras palabras, ¿en qué forma puede el viento superar la barrera del campo geomagnético y provocar los movimientos del plasma en el interior de la magnetosfera?

En 1960 Frank Johnson, de la compañía Lockheed, sugirió, en respuesta a la cuestión, que la magnetosfera era esencialmente cerrada. Según esta hipótesis, el viento solar podría transferir energía y cantidad de movimiento al plasma que rodea la Tierra sólo por movimientos de ondas a lo largo de la magnetopausa. Los movimientos vendrían producidos por interacciones viscosas entre el plasma del viento solar y el plasma de la magnetosfera; el proceso recuerda la formación de olas marinas al paso del viento sobre el agua. Estas ondas se observan en la magnetopausa. Pero no parecen capaces de crear una circulación a gran escala en la magnetosfera, ni de originar las intensas perturbaciones que con frecuencia ocurren allí. Tales ondas tampoco permitirían una penetración eficaz en la magnetosfera del plasma acelerado del viento solar.

Por todos esos motivos se desecha que las ondas de la magnetopausa sean los mecanismos principales en cuya virtud el viento solar influya en la magnetosfera. El mecanismo de reconexión magnética —propuesto en 1961 por el físico británico James W. Dungey— podría, en cambio, ofrecer una mejor explicación. En este proceso alternativo, las líneas de fuerza del campo magnético interplanetario se conectan temporalmente con las líneas de fuerza del campo geomagnético en la cara diurna de la magnetopausa (*véase la figura 2*). Este acoplamiento de las líneas de fuerza permite la transferencia de grandes cantidades de plasma y de energía magnética del viento solar a la magnetosfera.

La reconexión adquiere particular eficiencia cuando el campo magnético interplanetario tiene una componente dirigida hacia el sur, esto es, una dirección opuesta al norte del campo magnético de la Tierra en la cara diurna de la magnetosfera. En estas condiciones, se produce la reconexión a lo largo de un ancho cinturón ecuatorial, abriendo así el confín exterior de la magnetosfera al viento solar. La reconexión también tiene lugar para otras orientaciones del CMI, pero discurría en latitudes más altas, donde la energía cedida fluiría bordeando la magnetosfera, no en su interior.

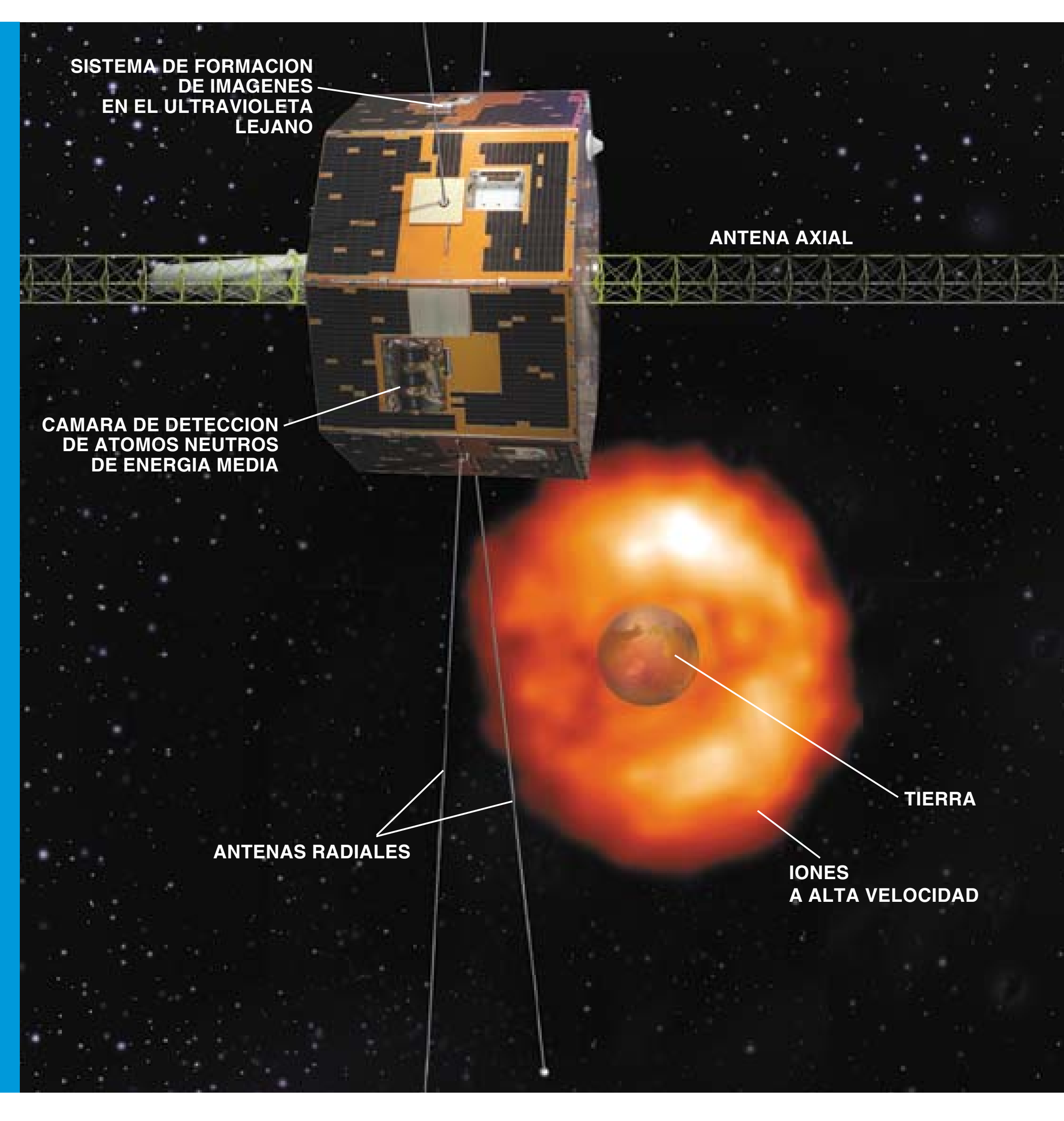
La transferencia de energía magnética del viento solar altera radicalmente la forma de la magnetosfera. Cuando comienza la reconexión en la cara diurna de la magnetopausa, las líneas acopladas de los campos CMI y geomagnéticos son empujadas por el viento solar y llevadas hacia los polos terrestres, inyectando energía en los lóbulos septentrional y meridional de la larga magnetocola de la cara nocturna. A medida que los lóbulos se hinchan con la energía magnética añadida, la película de plasma que yace entre ellos se estrecha. El proceso continúa hasta que las líneas de fuerza de los lóbulos norte y sur, que tienen direcciones opuestas, se juntan y se reconectan.

Esta segunda reconexión libera el campo magnético del viento solar, habilitándolo para que continúe su viaje a través del sistema solar. Al mismo tiempo permite que las líneas de fuerza del campo magnético de la Tierra, estiradas durante la fase de carga de los lóbulos, regresen a su configuración normal. El movimiento brusco de las líneas de fuerza calienta y acelera a los iones y electrones de la película de plasma, inyectándolos hacia las partes internas de la magnetosfera. Algunas de estas partículas, en su propagación por las líneas del campo geomagnético, llegan a las capas altas de la atmósfera terrestre por encima de los polos y, al colisionar con los átomos de oxígeno y moléculas de nitrógeno, provocan emisiones aurorales en distintas longitudes de onda: rayos X, ultravioleta, visible y radio. La secuencia completa de estos sucesos —desde la reconexión en la cara diurna hasta la reconexión en la cara nocturna, terminando en las auroras— recibe el nombre de subtormenta magnetosférica.

Además de transferir energía magnética a los lóbulos de la cola, la reconexión de la cara diurna intensifica también el campo eléctrico a lo largo de la magnetocola. Así reforzado, el campo promueve el flujo de iones y electrones desde la película de plasma hacia la magnetosfera interior. El flujo alimenta la corriente anular de la Tierra, formada por partículas que circulan alrededor del planeta, sobre el ecuador y a cotas comprendidas entre 6400 y 38.000 kilómetros. Durante los períodos más largos

El autor

JAMES L. BURCH, vicepresidente de la División para las Ciencias Espaciales e Ingeniería del Instituto de Investigación del Sur en la texana San Antonio, está al frente de la misión IMAGE. En su dilatada carrera, Burch se ha ocupado de los procesos de las auroras, la reconexión magnética y la obtención de imágenes de la magnetosfera.



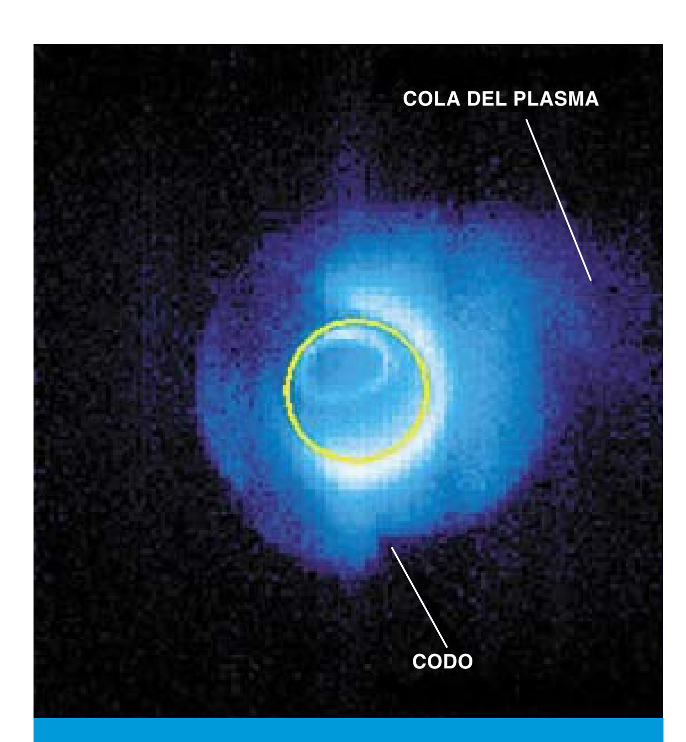
3. COMPOSICION GRAFICA que presenta el satélite IMAGE sobre una nube de iones de alta velocidad que rodean la Tierra. Para obtener la imagen de los iones se recurre a datos facilitados por la cámara de detección de los átomos neutros de alta energía (el instrumento que yace a un lado del satélite opuesto al de la cámara de átomos neutros de energía media). La cámara de plasma emisor de radio instalada en IMAGE cartografía las nubes de partículas cargadas enviando pulsos de radioondas desde dos antenas axiales de 10 metros y cuatro antenas radiales de 250 metros de longitud. Aunque el cuerpo del satélite tiene sólo una anchura de 2,25 metros, las antenas convierten a IMAGE en uno de los mayores sensores lanzados al espacio.

de reconexión en la cara diurna —que tienen lugar cuando la orientación del campo magnético interplanetario permanece hacia el sur— el flujo plasmático continuado que se dirige a la Tierra aumenta el número y la energía de las partículas cargadas en la corriente anular. Si el CMI persiste largo tiempo dirigido hacia el sur, puede presentarse una sucesión rápida de subtormentas, cada una de las cuales inyecta más partículas hacia la Tierra. El aumento final de la intensidad de la corriente anular constituye la signatura clásica de una tormenta geomagnética que ya ha pasado.

Intervención del Sol

La orientación del CMI adopta una componente sur con bastante frecuencia. Por ello mismo, menudean las subtormentas geomagnéticas. En promedio, ocurren unas cuantas veces cada día y duran de una a tres horas. Pero las grandes tormentas geomagnéticas, como la del día de la Bastilla, son raras. Aunque pueden presentarse en cualquier momento del ciclo solar de 11 años, suelen ser más frecuentes en el período de máximo.

Hasta principios de los años noventa, atribuíase a las fulguraciones solares el origen de las tormentas geomagnéticas. Pero las observaciones del Sol y del espacio han venido señalando, prueba a prueba, otras fuentes. En 1993 John T. Gosling, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, reunió todos los datos en un artículo publicado en *Journal of Geophysical Research* que desmontaba el mito de las fulguraciones solares. Gosling avanzó una propuesta convincente sobre el papel central desempeñado por las eyecciones de materia coronal en el desencadenamiento de las grandes tormentas geomagnéticas. Se ignora la causa determinante de tales erupciones violentas coronales solares, aunque es probable que este fenómeno comporte una reconfiguración de las líneas del campo magnético allí. Las EMC están con frecuencia, pero no siempre, asociadas a las fulguraciones del Sol.



4. LA ESFERA DE PLASMA aparece como una nube azul pálido de iones que rodean la Tierra (*círculo amarillo*) en esta imagen obtenida por el instrumento de ultravioleta extremo de IMAGE durante la moderada tormenta geomagnética que se produjo el 24 de mayo de 2000. Los resultados confirmaron la existencia predicha de una cola de plasma y revelaron una estructura inesperada, un "codo".

No todas las EMC provocan tormentas geomagnéticas. En su mayoría, las erupciones no se dirigen hacia la Tierra, y, de las que lo hacen, una de cada seis es "geoefectiva", es decir, de intensidad suficiente para desencadenar una tormenta. El factor principal estriba en la velocidad de las EMC con relación a la del viento solar. Sólo las EMC más rápidas son geoefectivas. ¿Por qué? Cuando las céleres EMC atraviesan el lento viento solar, producen ondas de choque interplanetarias, responsables de las cascadas de partículas de alta energía y de las notables deformaciones del campo magnético terrestre. Mayor importancia reviste otro fenómeno: la EMC rápida comprime el viento solar que se halla por delante, con lo que aumenta la intensidad del campo magnético en la región comprimida y en la parte frontal de la propia EMC. Es más, esta intensificación del campo magnético alrededor de la EMC tiende a inclinar a lo largo de la dirección norte-sur el campo magnético interplanetario, lo que permite una reconexión aún mayor cuando el CMI se encuentra con el campo magnético terrestre.

Un cierto tipo de tormenta geomagnética más débil ocurre durante el intervalo de máximo a mínimo del ciclo solar y cerca del mínimo de actividad. Estas perturbaciones, recurrentes en fase con el período de rotación solar de 27 días, tienen su origen en la interacción entre los vientos solares rápidos procedentes de los huecos coronales y los vientos solares lentos originados en el cinturón ecuatorial del Sol. Aunque las EMC no son la causa principal de las tormentas recurrentes, podrían reforzar su intensidad.

La tormenta espacial perfecta

Con el lanzamiento de IMAGE el año 2000, los investigadores disponen de los medios para obtener vistas globales del progreso, minuto a minuto, de una gran tormenta geomagnética. El satélite recorre una órbita polar elíptica, a una cota variable entre los 1000 y los 46.000 kilómetros. Esta trayectoria le consiente observar una fracción extensa de la magnetosfera, incluidas la cara diurna de la magnetopausa, la parte interna de la magnetocola y las regiones de la cúspide polar, que son las principales vías de entrada de las partículas procedentes del viento solar.

Los instrumentos de IMAGE están diseñados para realizar observaciones de los plasmas de la magnetosfera muy diversas. El satélite porta tres detectores de átomos neutros de alta energía (ENA), que miden indirectamente el flujo de iones. Cuando un ion rápido (como el ion de oxígeno) choca contra uno de los átomos neutros de hidrógeno de la magnetosfera, les arranca en ocasiones su único electrón, convirtiéndose así el hidrógeno en un átomo neutro de alta energía. Puesto que este átomo carece ya de carga, no tiene por qué desplazarse a lo largo de las líneas del campo geomagnético. Viaja en línea recta desde el punto en el que fue creado. Los detectores ENA recogen el número y energías de estos átomos neutros que proceden de una región determinada; a partir de tales datos se deduce la masa, velocidad, dirección y densidad de los iones de la zona en cuestión.

El satélite también lleva varios instrumentos que registran las emisiones en el segmento ultravioleta del espectro. El detector de ultravioleta extremo mide la densidad de átomos de helio ionizados en la esfera plasmática —una región en forma de rosquilla que ocupa la parte interior de la magnetosfera y que contiene plasma de baja energía— al medir la luz ultravioleta solar que absorben y que luego irradian. El sistema de imagen del ultravioleta lejano dispone de dos instrumentos para observar las auroras —la cámara de banda ancha y la cámara espectrográfica—, así como de unos fotómetros Geocorona para registrar las emisiones de los átomos de hidrógeno neutro. Por último, la cámara de radioplasma envía pulsos de ondas radio que rebotan en las nubes de partículas cargadas; opera como un radar: las señales de radio devueltas aportan información sobre la dirección, velocidad y densidad de las nubes de plasma.

Durante el episodio del día de la Bastilla, IMAGE comenzó a grabar los efectos de la tormenta, cuando no habían transcurrido dos minutos desde que la onda de choque originada por la EMC chocara contra el

campo magnético de la Tierra, el 15 de julio. La cámara de banda ancha envió fotografías interesantes de la aurora boreal desencadenada por la compresión del campo. La película creada con las fotografías muestra la aparición de un brillo súbito e intenso en un anillo sobre la región del Artico —el óvalo de la aurora— con emisiones brillantes como lenguas de fuego hacia el polo norte. La aurora se calmó en menos de una hora, desde el comienzo de la tormenta. Pero de nuevo brilló intensamente cuando un segundo choque tuvo lugar alrededor de las 17:00 TU. Siguieron unas subtormentas poderosas, ya que la energía almacenada en la magnetocola fue liberada de forma explosiva en las capas altas de la atmósfera. Las subtormentas y las consecuentes auroras continuaron a lo largo del resto del día 15 de julio y durante la mañana del 16.

Durante la fase principal de la tormenta, a las cuatro horas del inicio de ésta, la intensidad del campo magnético de la superficie de la Tierra cayó bruscamente hasta 300 nanotesla por debajo de su valor normal. Este fenómeno, distintivo de las tormentas geomagnéticas, se debe al rápido crecimiento de la corriente anular. Los sensores de átomos neutros de alta energía instalados a bordo de IMAGE produjeron imágenes impresionantes de este flujo de iones y electrones alrededor de la Tierra, cuando alcanzó su pico máximo el 16 de julio y empezó luego a disminuir. En cuanto se debilita la transferencia de energía del viento solar, se frena el flujo de plasma hacia la magnetosfera interna y se pierden iones de la corriente anular a un ritmo mayor que el de arribada de otros nuevos. Con el debilitamiento mayor de la corriente, cobra fuerza el campo magnético en la superficie terrestre. En pocos días se restablecen los niveles anteriores a la tormenta, pero se tarda más de un mes en el caso de tempestades violentas.

Las tormentas geomagnéticas modifican también la estructura de la esfera plasmática. Durante un episodio, el flujo reforzado de plasma desde la magnetocola hacia la Tierra erosiona la esfera plasmática, llevándose las partículas cargadas hacia la magnetopausa en la cara diurna. Cuando amaina, la esfera de plasma se rellena con un flujo de iones procedente de las capas superiores de la atmósfera. Se había predicho, de acuerdo con modelos informáticos, que el material erosionado de la esfera plasmática formaría una cola larga extendiéndose hasta la magnetopausa en la cara diurna, para perderse desde ahí en el viento solar. Las imágenes globales de la esfera plasmática obtenidas por los instrumentos de ultravioleta extremo de IMAGE han confirmado esa hipótesis que se remonta 30 años atrás. Las imágenes revelan, además, unas estructuras en la esfera que plantean nuevos interrogantes sobre su respuesta dinámica ante las perturbaciones magnetosféricas.

En el horizonte

Aunque IMAGE ha abierto una nueva ventana por donde mirar la magnetosfera, la verdad es que queda mucho por conocer sobre el clima espacial. Al contrario de lo que ocurre con las nubes terrestres, las nubes de plasma observadas por IMAGE son transparentes: nada se esconde a la vista, pero carecemos de una percepción de la profundidad. Por tanto, existirá siempre la necesidad de satélites que acometan mediciones locales del plasma, así como de los campos y de las corrientes que gobiernan sus movimientos.

El próximo paso a dar en la investigación del clima del espacio requerirá el concurso de escuadrillas de satélites que, a la manera de los aviones cazadores de huracanes, acudirán allí donde se desarrolle la acción. La Agencia Espacial Europea (ESA) realiza ahora su primera misión, Grupo II (*Cluster* II), lanzada en el verano de 2000. El predecesor de esta misión, Grupo I, se destruyó como consecuencia de una explosión del cohete justo después del despegue en 1996. La misión Grupo II consta de cuatro satélites idénticos, muy próximos entre sí, diseñados para medir los fenómenos turbulentos del plasma en la magnetosfera y del inmediato viento solar. La NASA proyecta lanzar otra escuadrilla en el año 2006. La misión Multiescala Magnetosférica estudiará la reconexión, la aceleración de partículas cargadas y la turbulencia de la magnetopausa en su cara diurna y en puntos específicos de la magnetocola donde se originan las subtormentas.

Las agencias espaciales están considerando misiones más ambiciosas que conlleven constelaciones de satélites: docenas de aparatos pequeños que realicen un seguimiento de grandes regiones del espacio, a la manera en que una red global meteorológica controla ahora las condiciones sobre la Tierra. Las primeras constelaciones se concentrarán, muy probablemente, en la magnetosfera interna y la cara diurna de la magnetopausa, con cada uno de los satélites del tamaño de un pastel recopilando información sobre las características básicas de los plasmas y de los campos magnéticos.

La magnetosfera terrestre es protectora a la vez que peligrosa. Sus campos magnéticos intensos escudan a los humanos impidiendo que penetre radiación que podría ser letal. Pero el campo carece de intensidad suficiente para repeler las ondas de choque más poderosas que nos llegan del Sol. Como la tierra de fuego de los tornados o como las regiones de ciclones tropicales, la magnetosfera es un lugar de tormentas súbitas. De ahí el interés extraordinario de los vigilantes de tormentas como el satélite IMAGE.

Bibliografía complementaria

FROM THE SUN: AURORAS, MAGNETIC STORMS, SOLAR FLARES, COSMIC RAYS. Dirigido por S. T. Suess y B. T. Tsurutani, American Geophysical Union, 1998.

THE 23RD CYCLE: LEARNING TO LIVE WITH A STORMY STAR. Sten Odenwald, Columbia University Press, 2001.

LA TELEINMERS

Este nuevo medio de telecomunicación, que combina la realidad virtual con la videoconferencia, permite la interacción natural entre personas separadas por grandes distancias

Jaron Lanier

Como otros muchos investigadores, utilizo a menudo la videoconferencia. La interacción humana tiene elementos verbales y no verbales. Pero la videoconferencia parece como si se hubiera ideado expresamente para embrollar los no verbales. En los sistemas de videoconferencia actuales es imposible, por ejemplo, mirarse a los ojos porque la cámara y la pantalla no pueden ocupar la misma posición. Esto suele dar un tono envarado y frío a las relaciones, ya que el cruce de miradas es casi siempre un medio subconsciente de transmitir confianza. Los participantes tampoco pueden adquirir consciencia de sus posiciones relativas y, por tanto, no disponen de un modo claro de llamar la atención y expresar aprobación o desacuerdo.

La teleinmersión es un nuevo sistema de interacción humana a través de técnicas digitales que confiere al usuario la ilusión de compartir un mismo espacio físico con otras personas, aunque se hallen alejadas miles de kilómetros. Para ello se combinan los procesos de visualización e interacción propios de la realidad virtual con nuevas técnicas de visión que trascienden las tradicionales limitaciones de una cámara. En vez de ceñirse a observar personas y su entorno inmediato desde una sola posición preeminente, las estaciones de teleinmersión las reproducen como “esculturas animadas”, sin limitarse a favorecer una perspectiva exclusiva. El resultado es que todos los participantes, por alejados que estén, pueden compartir y explorar un espacio de proporciones naturales.

Además de perfeccionar la videoconferencia, la teleinmersión constituye un medio ideal para investigar en ingeniería de redes, específicamente en Internet2, consorcio creado en los Estados Unidos para estudios avanzados de redes. Si una red de ordenadores admite la teleinmersión, probablemente podrá servir de soporte para cualquier otra aplicación. Y la razón es que los flujos de información en la teleinmersión han de tener un retardo mínimo y lo más uniforme posible, además de cumplir los requisitos usuales en cuanto a volumen y seguridad del tráfico.

SION



1. JARON LANIER, físicamente en la neoyorquina Armonk, aparece en una pantalla de teleinmersión en Chapel Hill (Carolina del Norte).

La realidad virtual y las redes

Situada la teleinmersión en la encrucijada de las investigaciones sobre realidad virtual y conexión de redes, así como en visión informatizada e interfaz con el usuario, conviene recordar algunos antecedentes en campos tan diversos.

En 1965, Ivan Sutherland, padre del grafismo informático, propuso la "representación final", que permitiría al usuario experimentar como si fuera real un espacio enteramente informatizado, al que Sutherland denominó "mundo virtual". En 1968, Sutherland realizó su primer mundo virtual mediante lo que podría llamarse un casco visualizador. Este artilugio incorporaba un par de pantallas situadas frente a los ojos para producir la sensación de inmersión en un espacio estereoscópico, tridimensional. Al mover el usuario la cabeza, el ordenador recomponía rápidamente las imágenes que contemplaba cada ojo para mantener la ilusión de que el mundo representado permanecía fijo mientras el usuario lo exploraba.

Por los años ochenta dirigía yo la primera compañía que comercializó herramientas comunes para construir y experimentar mundos virtuales; en gran medida la causa fue el interés de esta revista, *Investigación y Ciencia*, por las nacientes técnicas digitales reflejando en la portada de noviembre 1984 uno de mis experimentos de programación visual. Denominé lenguaje de programación virtual (VPL) al objeto de mi investigación. Tras la publicación de aquel número, los inversores empezaron a llamar, y así nació la compañía VPL. Mediados los ochenta, VPL comenzó a vender herramientas del mundo virtual, siendo muy conocidas las de tipo de guante, representadas en otra portada de *Investigación y Ciencia*, concretamente la de diciembre de 1987.

En la segunda mitad de ese decenio VPL realizó las primeras experiencias en lo que decidí llamar "realidad virtual". En este concepto se combina la idea de mundo virtual con la interconexión de redes, haciendo que múltiples participantes coincidan en un espacio virtual por medio de pantallas montadas en cascos. En 1989 VPL introdujo el producto "realidad para dos", o RB2 ("Reality Built for Two"), gracias al cual dos participantes pueden compartir un mundo virtual. Una curiosa implicación de la realidad virtual es que cada participante debe poder ver representaciones de los demás, que suelen llamarse "avatares" por analogía con las reencarnaciones hindúes. La potencia de procesamiento en aquellos tiempos sólo conseguía avatares muy elementales, casi como dibujos animados, que reproducían muy burdamente los rasgos de los usuarios, pero transmitían bien sus movimientos y creaban, por tanto, sensación de presencia, concentrando emoción e interés.

Al principio sólo podíamos compartir mundos virtuales a través de cortas distancias físicas, pero también tanteamos las aplicaciones de larga distancia. Conseguimos así establecer sesiones de realidad virtual entre Japón y California, y entre Alemania y California. Estas demostraciones no sometían a prueba la red, pues sólo había que enviar los movimientos de los participantes, no la superficie completa de las personas como en el caso de la teleinmersión.

La investigación sobre redes informáticas ha corrido paralela a la de la realidad virtual. La red original, la Arpanet, se ideó a finales de los años sesenta. En ella se inspiraron otras redes, y en los ochenta se combinaron todas ellas en Internet. A medida que se desarrollaba Internet se establecían en su interior diversas redes dorsales, que pueden transmitir velozmente información a largas distancias por circuitos con gran capacidad de conexiones simultáneas. Como soporte a la investigación se concibieron redes notables, la NSFnet al final de los ochenta y la vBNS a mediados de los noventa, que influyeron en la inspiración de nuevas aplicaciones para Internet, como ha sido la omnipresente telaraña mundial (*World Wide Web*). Abilene, otro proyecto de investigación de red dorsal, comenzó en 1998 con el fin de atender a Internet2.

Abilene llega a más de 170 universidades de Estados Unidos. Bastaría para justificar su existencia la aportación de una banda muy ancha (gran número de bits por segundo), pero además se pretendía cubrir otros objetivos. Por ejemplo, el desarrollo de nuevos protocolos para el tratamiento de aplicaciones que requieren anchura de banda muy elevada y unos retardos controlados mínimos ocasionados por el procesamiento de las señales en ruta.

Internet2 presentaba un problema peculiar: ninguna aplicación actual exigía el nivel de prestaciones previsible. El progreso de la informática suele guiarse por el razonable supuesto de que unas herramientas digitales más rápidas y capaces siempre encontrarán aplicaciones útiles, aunque a veces no sepamos cuáles. Con todo, esta fe no era suficiente en la investigación avanzada de redes: las nuevas ideas necesitaban someterse a contrastación.

Allan H. Weiss, promotor de la NSFnet, era responsable de una organización de investigación sin ánimo de lucro, Advanced Network and Services, en la que residía y se administraba la ingeniería para Internet2. Acuñó el término "teleinmersión" para designar una aplicación de "distribución" idealizada, y me ofreció la dirección científica de un proyecto nacional de teleinmersión que lo hiciera realidad. Acepté con entusiasmo, ya que era la prolongación lógica de mi trabajo anterior sobre mundos virtuales compartidos.

Aunque para disfrutar de un sistema de teleinmersión operativo había que inventar o perfeccionar numerosos componentes como el sistema de visualización, el desafío mayor era crear un procedimiento adecuado para la detección visual de personas y lugares. A simple vista podría parecer que esto no difiere mucho de la videoconferencia.

Mar de cámaras

El quid de la teleinmersión consiste en que cada participante tenga una visión personal de escenas lejanas: una escena por cada



2. UNOS TELECOLABORADORES, alejados a cientos de kilómetros, consideran un modelo clínico generado por ordenador, al cual pueden ambos manipular como si fuera un objeto real. El casco que llevan sirve para que los ordenadores determinen la posición y la orientación de la cabeza de los usuarios, condición esencial para la correcta visión de la escena. En el futuro esta pieza no será necesaria.

ojo para mantener la sensación de relieve. Además, los participantes deben gozar de libertad de movimientos, lo que hará variar continuamente la perspectiva de cada persona.

La teleinmersión exige que la escena se explore sin dar preferencia a ninguna dirección concreta (por el contrario, una cámara está obligada a retratar una escena desde su propia posición). Cada lugar, con las personas y cosas que contiene, se ha de explorar desde todas las direcciones a la vez y transferirse como una escultura tridimensional animada. En cada ubicación remota se recibirá una información que describa la escultura animada entera y restituya los ángulos de visión como en ese lugar se necesite. El proceso de exploración debe desarrollarse con celeridad suficiente para verificarse en tiempo real, a lo más en una pequeña fracción de segundo. La escultura que representa la persona podrá entonces actualizarse con la rapidez exigida para lograr la ilusión de movimiento continuo. Esto se consigue a partir de unos 12,5 cuadros por segundo, pero se asegura a 25 cuadros por segundo y todavía más a frecuencias superiores.

De muchas maneras pueden explorarse los contornos tridimensionales móviles de los ocupantes y demás objetos de un recinto. En 1993, Henry Fuchs, de la Universidad de North Carolina, propuso el método del "mar de cámaras", en el que se comparan las imágenes tomadas por numerosas cámaras. En las escenas de un entorno humano típicas aparecen peculiaridades, como los pliegues de la ropa, que son visibles para más de una cámara. Mediante unos algoritmos que comparan los ángulos con que ven estas irregularidades las diferentes cámaras, se compone un modelo tridimensional de la escena.

Esta técnica se había probado ya en configuraciones de tiempo no real. En particular en los trabajos de Takeo Kanade, que culminaron en la demostración de "realidad virtual" en la Universidad Carnegie Mellon. Sucedía eso en 1995. Se montaron allí sobre una cúpula geodésica 51 cámaras orientadas al interior. Al no operar en tiempo real, este sistema no servía para teleinmersión, y hubo que limitarse a tomar grabaciones en vídeo para su posterior procesamiento.

El autor

JARON LANIER, uno de los progenitores de la realidad virtual, dirige la sección científica de Advanced Network Services, consorcio no lucrativo que acoge y financia el centro de ingeniería de Internet2. Investiga en programación visual, simulación y aplicaciones de red de alta calidad.



3. TRES USUARIOS en ciudades diferentes pueden compartir un espacio virtual gracias a este cubículo televisivo.

Ruzena Bajcsy, responsable del Laboratorio GRASP (robótica general, automación, exploración y percepción) de la Universidad de Pennsylvania, se interesó por la idea del mar de cámaras en tiempo real. Desde 1994, trabajó junto a colegas de Chapel Hill y la Carnegie Mellon en la recogida de datos del mundo real con pequeños bloques de dos o tres cámaras para aplicaciones de realidad virtual.

Bajcsy y Kostas Daniilidis crearon el primer mar de cámaras en tiempo real, que además era modular y adaptable a diferentes tamaños de estancias y aplicaciones. Trabajaron en estrecha relación con el grupo de Chapel Hill, quienes se encargaron de tomar los datos de la "escultura animada" y convertirlos, mediante técnicas de informatización de gráficos, en una escena realista para cada usuario.

Pero el mar de cámaras no es en sí una solución completa. Supongamos que las cámaras contemplan una pared blanca lisa. Como en esa superficie no se advierte particularidad alguna, las cámaras no disponen de información para construir un modelo escultórico. Para las personas no hay confusión: podemos mirar una pared blanca sin pensar en que pueda ser el paso a un infinito abismo de blancura, porque nuestra mente no se apoya sólo en señales geométricas, sino que tiene también un modelo de habitación que rechaza las interpretaciones erróneas. Por desgracia, la frente o la camisa de una persona pueden plantear el mismo problema que una pared blanca a las cámaras digitales de hoy; el programa informático carece de capacidad suficiente para deshacer la confusión resultante.

Los expertos de Chapel Hill aportaron un novedoso método, llamado "luz estructurada imperceptible" (LEI), que promete superar este obstáculo. El parpadeo de una bombilla común, a 50 o 60 veces por segundo, resulta, por su rapidez, imperceptible al ojo humano. De manera equivalente, la LEI parece a simple vista una fuente continua de luz blanca, como una bombilla ordinaria, pero en realidad está repleta de formas en rápida variación que sólo son visibles para cámaras especiales, cuidadosamente sincronizadas. Estas formas introducen rasgos distintivos en espacios vacíos como los de una pared blanca, lo cual permite completar las mediciones tomadas por el mar de cámaras.

El momento Eureka

Por fin pudimos probar la teleinmersión. El 9 de mayo de 2000, lográbamos la conjunción virtual de tres lugares distintos. En el telecubículo de Chapel Hill se agolpaban físicamente cerca de una docena de directivos, que por turno se fueron sentando en la oficina simulada del futuro. Por muy fascinantes que hayan sido los tres años de investigación que condujeron a esta prueba, no me podía imaginar el gozo de experimentar la teleinmersión. A través de unas gafas polarizadoras dos paredes del cubículo se disolvían en ventanas, descubriendo otros despachos en los que otras personas me miraban. (Gracias a las gafas cada ojo veía una escena ligeramente distinta, creando así el efecto estereoscópico). Traspasando las paredes respectivas saludé a dos colaboradoras, una en mi laboratorio de Nueva York y otra en Pennsylvania.

Las personas y lugares que ahora contemplaba procedían de la realidad, no como los artificiosos modelos virtuales que estaba acostumbrado a manejar. No eran, sin embargo, perfectos. El "ruido" presente en el sistema aparecía en forma de confeti desparramado por los otros despachos. La frecuencia de cuadro era baja (de 2 a 3 cuadros por segundo), había hasta un segundo de retardo, y sólo uno de los interlocutores tenía acceso a visualizar la teleinmersión. Pese a todo, lo que tenía delante no era una representación artística del mundo real, sino una auténtica reproducción del mismo basada en los datos medidos.

En una demostración posterior (octubre de 2000), se eliminaría casi todo el confeti, mejorando la calidad general y la velocidad del sistema. Pero la innovación más importante fue la aportada por el grupo de Andries van Dam, de la Universidad Brown: en una sesión de teleinmersión introdujeron objetos virtuales no derivados de la escena física. Me senté en una mesa frente a Robert C. Zeleznik, de Brown, quien se encontraba físicamente en mi laboratorio neoyorquino de Armonk. Zeleznik depositó sobre la mesa un interior de despacho simulado (de unos sesenta centímetros de ancho), y por medio de punteros láser simulados y otros dispositivos modificábamos, de común acuerdo, las paredes y el mobiliario de ese despacho en el curso de nuestra conversación. Se consiguió así una notable fusión entre la experiencia de simulaciones asociadas con la realidad virtual y el simple trato con otra persona.

De las pruebas al desarrollo

Además del sistema de captación de escena, la teleinmersión comprende los ordenadores, los servicios de red y los dispositivos de visualización e interacción. Todos estos elementos se han perfeccionado para adecuarlos a la teleinmersión, y todavía se han de depurar más. La teleinmersión consume recursos informáticos vorazmente. En todos los casos posibles hemos optado por emplear componentes estándar, utilizados en aparatos domésticos y profesionales, con el fin de que la teleinmersión pueda pronto reproducirse fuera del laboratorio. En la actualidad se necesitan literalmente docenas de procesadores en cada estación para satisfacer las demandas de la teleinmersión, y hay que apilarlos en estanterías como ordenadores personales en cajas de plástico o bien como placas de circuitos en bastidores del tamaño de frigoríficos.

La mayoría de los procesadores se dedican a adquisición de escenas. El mar de cámaras está constituido por tríos de cámaras que se solapan. En este momento, para una persona sentada a una mesa solemos utilizar una red de siete cámaras que en la práctica se comporta como cinco tríos. A grandes rasgos, una agrupación de ocho procesadores Pentium de dos gigahertz con memoria compartida procesará, en tiempo aproximadamente real, un trío comprendido en un mar de cámaras. Dentro de este mismo año se espera disponer de tales grupos de procesadores. Aunque esperamos que los precios en informática sigan bajando como en los pasados decenios, todavía habrá que esperar algo para que la teleinmersión resulte rentable. Se prevé que el coste del grupo de ocho procesadores varíe entre 5 y 9 millones de pesetas en el momento de su introducción, y en cada ubicación (o estación) tendrá que haber uno de esos grupos por cada trío de cámaras. (Dejando aparte el procesamiento que requieren otras tareas.) Aún no sabemos cuántas cámaras necesitará un determinado uso de la teleinmersión; una hipótesis razonable sería fijar en siete el mínimo que requiere una conversación casual, mientras que podrían necesitarse 60 cámaras para las aplicaciones más exigentes, como demostraciones, consultas y lecciones quirúrgicas a larga distancia.

Las exigencias de computación no acaban con el procesamiento del torrente de imágenes que obtienen las cámaras. Todavía se necesitan más procesadores para sintetizar de nuevo y reproducir escenas variables, como los movimientos de cabeza de los participantes en una sesión. Al principio utilizamos un gran ordenador concebido para gráficos, pero luego los hemos sustituido por procesadores comerciales equipados con tarjetas de gráficos de reducido coste, sirviéndonos de un procesador para cada ojo. Se requieren procesadores adicionales para otras tareas, como las de combinar los resultados de los distintos tríos de cámaras, regular la imperceptible luz estructurada, medir los desplazamientos de cabeza del usuario, mantener la interfaz de usuario y realizar simulaciones de objeto virtual.

Por si esto fuera poco, y en vista de la necesidad de reducir al mínimo los retardos en la teleinmersión, habrá que dedicar cuantiosos recursos de procesamiento a los algoritmos de predicción. Recuérdese que la información que se transmite por fibra óptica llega a su destino con una velocidad próxima a dos tercios de la velocidad de la luz en el vacío, debido a que viaja por un medio distinto —el vidrio— y no se propaga en línea recta sino que va sufriendo reflexiones en la envoltura de la fibra. Por tanto, los bits de información tardan de 25 a 50 milisegundos en recorrer el trayecto de fibra que atraviesa los Estados Unidos, sin margen alguno para otros retrasos inevitables como los introducidos por los diversos encaminadores de señal de la red.

Por una cruel coincidencia, ciertos aspectos críticos de las reacciones de un mundo virtual no deberían experimentar un retardo mayor de 30 a 50 milisegundos. Superar este límite produce la fatiga y desorientación del usuario, le hace perder ilusión y, en el peor de los casos, le marea. Aunque tuviéramos ordenadores infinitamente rápidos en cada extremo, aún habría que recurrir a la predicción para compensar el retardo cuando se sostienen conversaciones de uno a otro extremo del país.

Un sugestivo camino a explorar en los próximos años consiste en dirigir el procesamiento de la teleinmersión en tiempo real a través de centros remotos de supercomputadores, accediendo así a una potencia de computación superior. En ese caso, el supercomputador tendrá velocidad suficiente para compensar el retardo adicional que introduzcan, desde un emplazamiento dado, los trayectos de ida y de retorno.

La anchura de banda es otra consideración esencial. En este aspecto, las exigencias varían con el entorno y la aplicación; cuanto más compleja sea la escena mayor será



4. COMPARANDO las dos vistas de una persona tomadas por las cámaras de teleinmersión se obtiene esta imagen. Los colores representan el primer cálculo somero de la profundidad de los rasgos de la persona.



ASI FUNCIONA LA TELEINMERSION
En esta ilustración esquemática de un futuro sistema de teleinmersión, dos interlocutores distantes 1600 kilómetros colaboran en un nuevo diseño de motor
“MAR DE CAMARAS”
Unas cámaras ocultas proporcionan multitud de perspectivas, que se comparan para crear modelos tridimensionales de los usuarios y su entorno. Las cámaras pueden esconderse tras minúsculos orificios de la pantalla, como en la situación expuesta, o bien instalarse en el techo, en cuyo caso la pantalla visualizadora deberá actuar también como superficie reflectante selectiva.
OBJETOS DE SIMULACION COMPARTIDOS
En el espacio común recreado aparecen objetos simulados, susceptibles de manipularse como si fueran modelos en funcionamiento. Una vía de investigación abierta busca las técnicas mejores para combinar los modelos que han desarrollado personas situadas en extremos opuestos utilizando herramientas informáticas locales e incompatibles entre sí.
FLUJO DE LA INFORMACION
La teleinmersión depende de un intenso procesamiento de datos en cada extremo de la conexión, con la intermediación de una red de alta calidad.
DEL EMISOR ...
Unos procesadores en paralelo aceptan la entrada que aportan las cámaras y reinterpretan la escena como un modelo informático en tres dimensiones.
INTERNET2

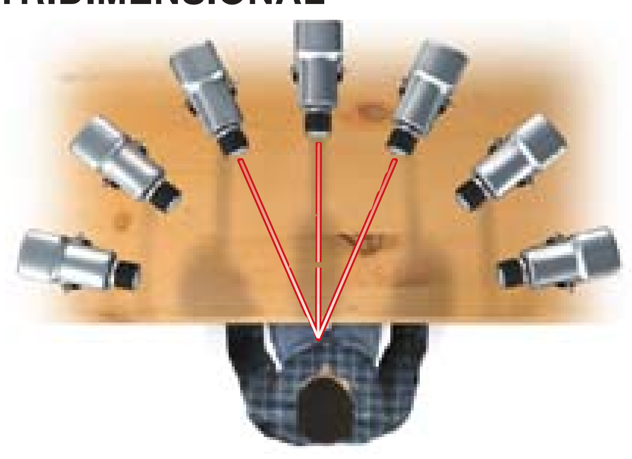
LUZ ESTRUCTURADA IMPERCEPTIBLE
A simple vista no se distingue de una iluminación blanca normal, pero proyecta destellos imperceptibles de formas que permiten a los ordenadores interpretar espacios de otro modo carentes de información visual.

ESPEJO VIRTUAL
El espejo virtual, característica de diseño de la interfaz, permite a los usuarios ver cómo se presentan ellos y su entorno a los demás participantes. En este caprichoso ejemplo, el usuario masculino ha elegido aparecer con ropa más formal que la que realmente viste. Todavía no existen programas que logren esta transformación, pero ya han aparecido ejemplos del filtrado visual que ello comporta.

PANTALLA
Los prototipos actuales utilizan dos proyecciones de imágenes polarizadas que se solapan, y exigen colocarse gafas polarizadas para que cada imagen sea vista por un ojo solamente. En el futuro esta técnica será sustituida por pantallas "autoestereoscópicas" que canalicen diferencialmente las imágenes a cada ojo sin necesidad de gafas.

... AL RECEPTOR
A partir del modelo recibido se sintetizan las reproducciones específicas de las personas y lugares alejados, que se acomodarán a la perspectiva individual de cada uno de los ojos. El proceso entero se repite muchas veces por segundo para reflejar los movimientos de la cabeza del usuario.

GENERACION DE LA IMAGEN TRIDIMENSIONAL

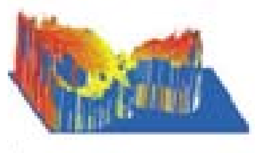


1 Una batería de cámaras contempla las personas y su entorno desde diferentes ángulos. Cada cámara genera una imagen desde su propia perspectiva muchas veces por segundo.





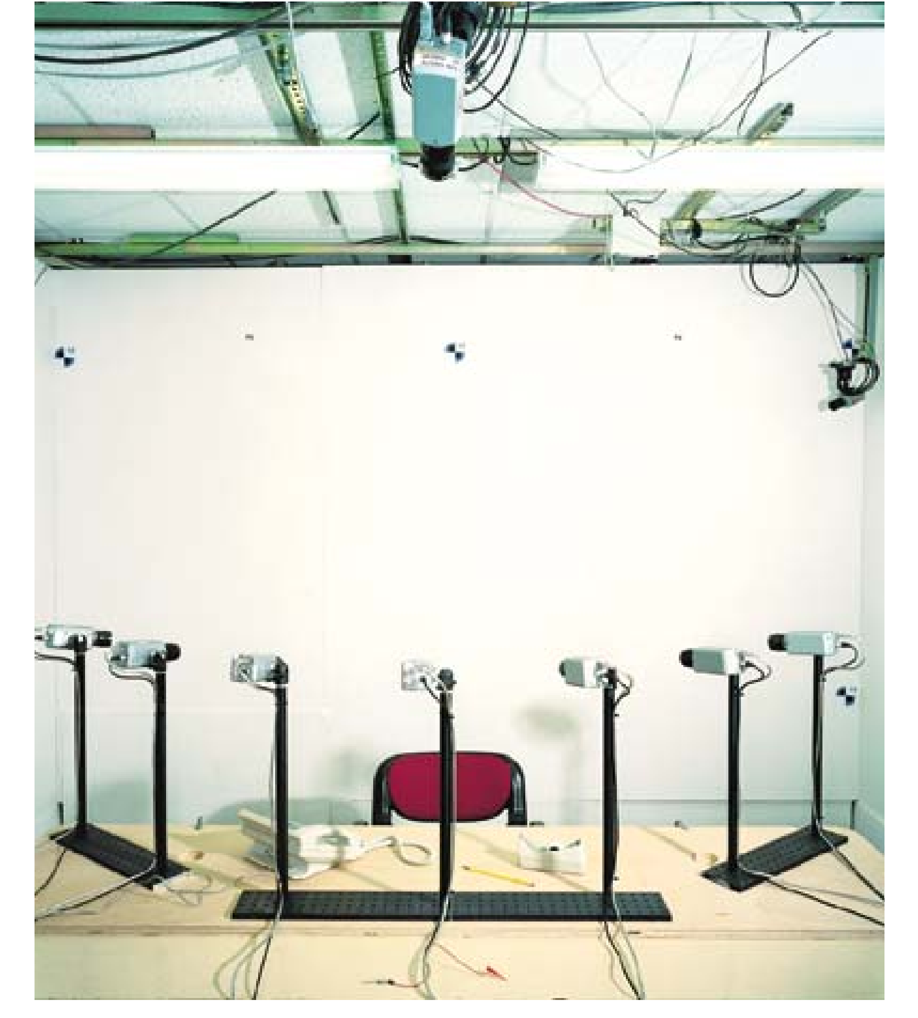
2 Cada conjunto de imágenes tomadas en un determinado instante se clasifica en subconjuntos de tríos de imágenes que se solapan.




3 A partir de cada trío de imágenes se calcula un "mapa de disparidades", que refleja el grado de variación entre las imágenes en todos los puntos del campo visual. Las disparidades se analizan seguidamente para traducirse en profundidades que representen las diferencias entre lo que ven las distintas cámaras. Los valores de profundidad se combinan en un mapa escénico de "bajo relieve".

4 Todos los mapas de profundidad se combinan en un solo modelo escultórico de la escena en un momento dado, independiente de la perspectiva. El proceso de combinación de los mapas de profundidad da oportunidad de suprimir los puntos espurios y el ruido.





5. SIETE CAMARAS escudriñan al usuario en la instalación de teleinmersión de Chapel Hill.

la anchura de banda requerida. Podemos suponer que gran parte de la escena, en especial las paredes del fondo y elementos similares, no cambia y por tanto no ha de volver a transmitirse en cada cuadro. Se ha comprobado que, para representar una sola persona sentada a la mesa, sin habitación a su alrededor, a una frecuencia de dos cuadros por segundo, se necesitan unos 20 megabit por segundo, con máximos que pueden alcanzar 80 megabit por segundo. Andando el tiempo, no obstante, estos valores descenderán al mejorarse las técnicas de compresión. En cada ubicación se han de recibir los flujos de información de todas las demás, de manera que en una conversación tripartita la anchura de banda se ha de multiplicar consecuentemente. La tendencia actual es que el "último tramo" de la conexión de red que llega a los departamentos de ciencia informática sea una línea OC3, capaz de transportar 155 megabit por segundo, lo suficiente para mantener una conversación a tres a una baja frecuencia de cuadro. Pero la verdad es que la línea OC3 tiene una capacidad 100 veces mayor que la conexión hoy considerada de banda ancha y, por tanto, resulta muchísimo más costosa.

Esperamos que en los años venideros se consiga una versión de teleinmersión que no exija ponerse gafas especiales ni otros artilugios del estilo. En la Universidad de Nueva York se ha desarrollado un prototipo de pantalla autoestereoscópica que podría lograr ese objetivo.

A grandes rasgos, la teleinmersión debería dividir su coste por 100 para poder competir en este momento con otras técnicas de telecomunicación, y además necesita refinarse. En el mejor de los casos, podría alcanzarse de aquí a cinco años la calidad y el nivel de costes necesario para una introducción limitada. En diez años se podría generalizar su utilización.

Perspectivas

Cuando se popularice la teleinmersión, probablemente ofrecerá variadas e importantes aplicaciones. Permitirá, por ejemplo, que ingenieros separados por grandes distancias colaboren en diseños informatizados de nuevas máquinas, y los manipulen como si fueran modelos reales sobre un banco de pruebas común. O que los arqueólogos de todo el mundo se incorporen a una excavación crucial. Y también que expertos muy cualificados en inspección de edificios o reparación de motores puedan visitarlos de un modo virtual, sin tener que perder tiempo en viajes aéreos.

De hecho, la teleinmersión —no así la videoconferencia— podría llegar a considerarse como una alternativa real a los viajes por avión. Muy pocos pretenderán que la teleinmersión alcance el mismo valor objetivo que la presencia física en un futuro próximo, pero sí que tenga calidad suficiente para las reuniones de empresa, consultas profesionales, sesiones de formación, ferias comerciales y eventos similares. A diez años vista, la te-

Miembros del equipo de teleinmersión

UNIVERSIDAD DE NORTH CAROLINA, CHAPEL HILL: *Henry Fuchs, Herman Towles, Greg Welch, Wei-Chao Chen, Ruigang Yang, Sang-Uok Kum, Andrew Nashel, Srihari Sukumaran*
www.cs.unc.edu/Research/stc/teleimmersion/

UNIVERSIDAD DE PENNSYLVANIA: *Ruzena Bajcsy, Kostas Daniilidis, Jane Mulligan, Ibrahim Volkan Isler*
www.cis.upenn.edu/sequence/teleim2.html

UNIVERSIDAD BROWN: *Andries van Dam, Loring Holden, Robert C. Zeleznik*
www.c.s.brown.edu/lsh/telei.html

ADVANCED NETWORKS AND SERVICES: *Jaron Lanier, Amela Sadagic*
www.advanced.org/teleimmersion.html

leinmersión podría sustituir sensiblemente a los viajes de negocios. Y no sólo porque la teleinmersión se perfeccione y abarate, sino porque el desarrollo del transporte aéreo se ve limitado por factores de seguridad, uso del terreno y preservación del entorno.

La teleinmersión podría tener efectos sorprendentes en las relaciones y ocupaciones humanas. Por ejemplo, la preocupación por el futuro de artistas, músicos y escritores al ser cada vez más fácil vulnerar los derechos de autor (por efecto de la copia generalizada de ficheros en Internet), ha llevado a proponer como solución las apariciones personales pagadas, ya que la interacción personal cobra más valor inmediato que la reproducción posterior desde un fichero o una grabación. La teleinmersión podría conseguir interacciones estéticas suficientemente prácticas y económicas para sentar bases diferentes en el comercio y las artes. Recuérdese a propósito que antes del siglo XX todas las artes eran interactivas. Los músicos establecían contacto directo con su auditorio, así como los actores en la escena o los poetas en un jardín. A través de la teleinmersión podrán aparecer versiones de todas estas artes que favorezcan la proximidad, la intimidad y la respuesta personal, respondiendo así a la crisis de los derechos de propiedad intelectual.

Bibliografía complementaria

Sitio de la Iniciativa Nacional de Teleinmersión: **www.advanced.org/teleimmersion.html**

Teleinmersión en la Universidad Brown: **www.c.s.brown.edu/lsh/telei.html**

Teleinmersión en la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill: **www.cs.unc.edu/Research/stc/teleimmersion/**

Teleinmersión en la Universidad de Pennsylvania: **www.cis.upenn.edu/sequence/teleim1.html**

Sitio de teleinmersión en Internet2: **www.Internet2.edu/html/tele-immersion.html**

Información sobre la pantalla autoestereoscópica: **www.mrl.nyu.edu/projects/autostereo**

Raíces de la violencia

La aplicación de métodos cuantitativos a la psicología social pone en cuestión la idea, muy arraigada, que vincula la violencia a la baja estima de uno mismo

Roy F. Baumeister

Hace algunos años un joven psicólogo de cierto gabinete asesor me habló del dilema al que se enfrentaba en su trato con jóvenes violentos. Sencillamente, sus impresiones directas no guardaban apenas relación con lo que le habían enseñado: sus clientes violentos le parecían unos engreídos convencidos, sin base, de tener grandes cualidades y de ser superiores a todas las demás personas, mientras que los libros de texto decían que esos jóvenes brutos sufrían, en realidad, baja estima de sí mismos. Pero los miembros del gabinete, él incluido, decidieron que, a pesar de lo que habían observado, no podían oponerse a décadas de investigación, y así se esforzaban por mejorar la autoestima de aquellos jóvenes, aunque con ello no lograban ninguna discernible reducción de sus tendencias antisociales.

La opinión de que la agresividad dimana de una escasa autoestima ha sido durante mucho tiempo un tópico muy extendido. Psicólogos, educadores sociales y profesores han estado persuadidos de que el aumentar la autoestima de los jóvenes era la clave para domeñar la violencia y favorecer el éxito social y académico de la juventud. Muchas escuelas mandan a sus alumnos poner en lista las razones por las que son ellos unas personas admirables o entonar cantilenas de autoencomio. Muchos padres y maestros no se atreven a criticar a los niños, por temor a que eso les cause graves daños psíquicos y haga de un prometedor muchacho un bruto peligroso o un lamentable perdedor. En algunas ligas deportivas todos los participantes obtienen algún trofeo.

No faltan quienes se han preguntado si tales blandenguerías son realmente el mejor modo de formar la autoestimación. Pero, ¿qué decir del supuesto que subyace a esas prácticas? Cuando, a comienzos de los años noventa, empezamos mis colegas y yo a ocuparnos del asunto, todos los artículos que leímos aludían al “muy conocido hecho” de que la baja autoestima es causa de violencia. Pero no pudimos encontrar un solo libro o artículo que aportara un enunciado formalizado de la teoría o adujera pruebas empíricas en su apoyo. Todo el mundo lo sabía, pero nadie lo demostraba.

Por desgracia para la tesis de la baja autoestima, los investigadores han ido componiendo gradualmente una imagen de qué sea el tenerse alguien en baja autoestima, y esta imagen no cuadra en absoluto con lo que sabemos acerca de quienes perpetran agresiones. Los sujetos que tienen de sí mismos una opinión negativa suelen ser típicamente esquivos, pasan



1. LA AGRESIVIDAD está relacionada con un grado exagerado de autoestima que se siente amenazada. Los criminales violentos se describen a sí mismos como superiores a los demás, como personas singulares y merecedoras de un trato preferente. Muchos asesinatos y violaciones se cometen en respuesta a humillaciones inferidas a la autoestima del criminal.



2. EN DETERMINADOS CENTROS se recomienda a los alumnos poner en lista las razones por las que son ellos unas personas admirables o entonar cantilenas de autoencomio.

por la vida procurando evitarse líos, sin dar señal alguna de que necesiten ante todo mostrarse superiores. Agredir, atacar, es arriesgarse, y quienes se tienen a sí mismos en poco tienden a evitar los riesgos. Cuando las personas con baja autoestima fracasan, la culpa suelen echársela a sí mismas y no a otras.

Ante las incongruencias de la tesis corriente, nos pusimos a idear una teoría sustitutiva que aprendiera de la alta estima en que se tenían violentos famosos. A Saddam Hussein no se le reputa precisamente de individuo modesto, cauto y dudoso de su propia valía. Y la exaltación por Hitler de la "raza dominadora" difícilmente podría considerarse como una declaración de baja autoestima. Estos ejemplos sugieren que la autoestima es, en verdad, una importante causa de agresiones, pero cuando la autoestima es alta, no cuando es baja.

Con el tiempo, llegamos a formular nuestra hipótesis en términos de 'egocentrismo amenazado'. No todos los individuos que se tienen a sí mismos en alta estima propenden a la violencia: esa favorable opinión de sí ha de combinarse con alguna exterior amenaza a ella, con que alguien la cuestione, la discuta o la socave. A la gente le gusta pensar bien de sí misma, y así es reacia a revisar a la baja su autoestima. Cuando alguien sugiere tal revisión, muchos individuos —los caracterizados por formas hipertróficas e inestables de alta autoestima— prefieren revolverse contra el mensajero.

Raíces múltiples de la agresividad

Sería absurdo sostener que la agresividad dimana siempre de un egocentrismo amenazado o que éste da siempre por resultado una agresión. La conducta humana es causada y modulada por varios factores. Muchas agresiones tienen poco o nada que ver con la autoevaluación de las personas. Pero si nuestra hipótesis es certera, una exagerada idea de uno mismo aumenta las probabilidades de agresión. Para aquellas acciones agresivas en las que entra en juego el amor propio del que las perpetra, creemos nosotros que el egocentrismo amenazado es un factor crucial. Nueva teoría que podría encarnarse en procedimientos eficaces de reducción de la violencia.

Y ¿cómo establece un psicólogo social si es la baja o la alta autoestima la que lleva a la violencia? No habiendo ningún método perfecto y general para comprender cuestiones complejas acerca de los seres humanos, los sociólogos solemos trabajar haciendo múltiples estudios con diferentes métodos. Un solo estudio puede ser puesto en tela de juicio, especialmente si hay opiniones contrarias. Pero cuando surge un modelo consistente, no pueden pasarse por alto las conclusiones.

Los investigadores calibran la autoestima proponiendo a los sujetos una batería de preguntas tales como: "¿Qué tal se lleva usted con los demás?" y "¿Tiene usted éxito en su trabajo o en sus estudios?" El sujeto va eligiendo una entre las varias respuestas posibles y la puntuación total que obtiene le sitúa en algún lugar de la escala de lo negativo a lo positivo. En rigor, es engañoso hablar de "personas de alta autoestima" como si se tratase de una categoría particular, pero la necesidad de establecer criterios de referencia obliga a emplear tales términos. Con la expresión "personas de alta autoestima" me refiero en general a las que puntuaron por encima de la mitad en la escala de la autoestima. Los análisis estadísticos tienen en cuenta todo el continuo de la escala.

Aunque pudiera parecer que la autoestima fluctúa bastante, lo cierto es que esas puntuaciones son muy estables. Los cambios de un día a otro tienden a ser pequeños, e incluso después de un fuerte contratiempo, la autoestima de una persona vuelve a su nivel previo en un tiempo relativamente corto. Los cambios principales van de la mano de las transiciones importantes en la vida, como cuando el muchacho que practicaba el atletismo en el colegio se encuentra, al pasar a la universidad, con que allí se compite mucho más duramente.

Agresividad cuantificada

Cuantificar la agresividad reviste mayor dificultad. Pese a todo, se consigue un cálculo aproximado preguntando simplemente a los sujetos si propenden a los estallidos de cólera y a las peleas. Esas autorreconocidas tendencias hostiles pueden entonces compararse con las puntuaciones que esos sujetos hayan obtenido en los tests de autoestima. En la mayor parte de las investigaciones la correlación hallada ha sido débil o menospreciable, aunque una importante excepción es el trabajo hecho a finales de la década de los ochenta por Michael H. Kernis y su grupo de la Universidad de Georgia. Distinguieron ellos entre autoestima estable y autoestima inestable, computando en varias ocasiones y mirando si fluctuaba la autoestima de cada sujeto. La mayor hostilidad informaban tenerla los individuos con autoestima alta aunque inestable. Los individuos con autoestima alta y estable eran los menos hostiles, y los de baja autoestima (ya fuese estable o inestable) tenían un grado de hostilidad intermedio.

Otro procedimiento consiste en comparar amplias categorías de gente. El promedio de los hombres tiene más alta autoestima que el de las mujeres y es también más agresivo. Las personas deprimidas tienen más baja autoestima y son menos violentas que las no deprimidas. Los psicópatas son excepcionalmente propensos a la agresividad y a la conducta criminal, y tienen muy favorables opiniones de sí mismos.

La información sobre cómo se ven a sí mismos ciertos asesinos, violadores y otros criminales tiende a ser más anecdótica que sistemática, pero el patrón que emerge no ofrece dudas. A menudo, los criminales violentos se describen a sí mismos como superiores a los demás, como personas de elite merecedoras de un trato preferente. Muchos asesinatos y violaciones se cometen en respuesta a golpes inferidos a la autoestima del criminal tales como insultos, desnudamientos y otras humillaciones. (Algunos criminales viven en ambientes en los que los insultos son una amenaza mayor que las opiniones que esos individuos tienen de sí mismos. La estima y el respeto dependen mucho del nivel al que se esté en la jerarquía social, y el rebajar a alguien puede traer consecuencias tangibles, hasta de amenaza de muerte).

A la misma conclusión se ha llegado estudiando otras categorías de gente violenta. Miembros de bandas callejeras han declarado que tenían favorables opiniones de sí mismos y que se volvían violentos si alguien se las discutía. Los matones en el campo de juego se consideran a sí mismos superiores a los demás muchachos; la baja autoestima se da en las víctimas de los matones y no en éstos. Los grupos violentos tienen, por lo general, unos sistemas de creencias evidentes que recalcan su superioridad sobre los otros. Lo más común es que las guerras se produzcan entre naciones orgullosas que, en su sentir, no son tratadas con el respeto que se merecen.

Otra de tales categorías es la de los alcohólicos. Es bien sabido que el alcohol interviene en numerosos tipos de actos criminales. La embriaguez hace responder con mayor violencia a las provocaciones. Se ha observado que el consumo de alcohol tiende a sobrevalorar a las personas. Claro que el alcohol relaja el autocontrol, y es difícil saber cuál de los dos factores sea el determinante de la conducta violenta del borracho.

También existe la agresión contra uno mismo. Alguna forma de egocentrismo amenazado parece ser un factor de muchos suicidios. Por ejemplo, cuando alguien rico y exitoso se suicida para no enfrentarse a la bancarrota, el descrédito o el escándalo. No puede mantenerse el concepto de superioridad y no se sabe aceptar una nueva identidad menos atrayente.

El autor

ROY F. BAUMEISTER ocupa la cátedra E. B. Smith en la Universidad de Case Western Reserve.

Pruebas de laboratorio

Tomadas en conjunto, estas observaciones sugieren que la teoría de la baja autoestima es errónea. Pero en ningún caso se ha buscado comprobar las hipótesis en ensayos de laboratorio. Al recorrer la bibliografía existente sobre el tema nos percatamos de que no había ningún estudio de laboratorio que investigara el nexo entre la autoestima y la agresividad. Por ello, nuestro siguiente paso fue realizar alguno en la senda iniciada antaño por Brad J. Bushman, de la Universidad estatal de Iowa.

Lo primero que había que hacer era obtener datos fiables sobre la consideración que de sí mostraban los participantes. Nos servimos de dos medidas de autoestima diferentes, para que, si no descubríamos nada, tuviéramos la relativa certeza de que no se trataba de un artefacto derivado del empleo de una escala particular. Pero también éramos escépticos en cuanto a estudiar solamente la autoestima. La hipótesis del egocentrismo amenazado sugería que la conducta agresiva tendería a darse tan sólo entre un subsector de la gente que tuviera alta estima de sí. Con la esperanza de identificar ese subsector hicimos pruebas sobre el narcisismo.

Según lo definen los psicólogos clínicos, el narcisismo es una perturbación mental que se caracteriza por una opinión desmesurada de sí mismo, afán de ser admirado, irrazonable o exagerado sentido de la propia importancia, total carencia de empatía (esto es, incapacidad de identificarse con los sentimientos de otras personas), actitud explotadora para con los demás, propensión a envidiar o deseo de ser envidiado, frecuentes fantasías de grandeza, y arrogancia. El constructo lo han hecho extensivo a más allá del campo de la enfermedad mental Robert Raskin, del Instituto de Ciencias de la Conducta en Tulsa, y varios de sus colegas, que han elaborado una escala para medir las tendencias narcisistas.

Nosotros incluimos esta medida junto a las escalas de autoestima, porque los dos rasgos no son igua-

les aunque sí están relacionados. Los individuos con alta autoestima no son necesariamente narcisistas: pueden ser buenos en algunas cosas y reconocerse como tales sin ser por ello engreídos ni considerarse seres superiores. Pero, a la inversa, un alto grado de narcisismo con baja autoestima es rarísimo.

El siguiente problema era cómo medir en el laboratorio la agresividad. El procedimiento por el que optamos consistió en hacer que unos voluntarios distribuidos en parejas se lanzaran unos a otros ráfagas de fuertes ruidos. El ruido es molesto y la gente suele tratar de evitarlo, así que viene a ser algo bastante análogo a la agresión física. En los famosos experimentos de psicología social realizados por Leonard Berkowitz en los años sesenta se empleaba el electrochoque, pero esta opción quedaba descartada por razones de seguridad.

A los participantes se les indicó que el ruido formaba parte de una competición. Cada participante rivalizaba con algún otro en un test del tiempo de reacción. Quien reaccionaba más despacio recibía una ráfaga de ruido cuyo volumen y duración los decidía su oponente. Este procedimiento difería del empleado en anteriores estudios, en los que había un sujeto que hacía el papel de "profesor" que administraba el ruido o descargas eléctricas a un "discípulo" cada vez que éste se equivocaba. Los críticos habían sugerido que los resultados de tal proceder serían ambiguos, porque un profesor podría administrar descargas o ruidos por creer sinceramente que ése era un modo eficaz de enseñar, lo que comprometía el análisis de la agresividad.

La prueba del escrito

Para averiguar cuál era la componente amenazada del egocentrismo, pedíamos a los participantes que redactaran un breve escrito donde expresasen su opinión sobre el aborto. Recogidos los escritos, los redistribuíamos dándole (ostensiblemente) a cada contrincante el ensayo del otro para que lo evaluara. A continuación, cada participante recibía su propio escrito con los comentarios y valoraciones que le había hecho el otro.

En realidad, las apreciaciones que hacían los sujetos eran decepcionantes. Poníamos entonces aparte los ensayos reales y los íbamos marcando al azar como buenos o malos. La valoración 'buena' incluía notas muy positivas en todos los aspectos y escrito a mano el comentario, "¡Sin objeciones, gran ensayo!". La valoración 'mala' incluía puntuaciones bajas y el comentario adicional "¡Este es uno de los peores ensayos que he leído!". Tras devolver los ensayos y las evaluaciones, dábamos instrucciones para la prueba del tiempo de reacción y los sujetos empezaban a competir. La medida de la agresividad era el nivel del ruido con que cada uno hacía salir de sus casillas al otro.

Los resultados respaldaban la teoría del egocentrismo amenazado, no la de la baja autoestima. La agresividad era mayor entre los narcisistas que habían recibido la crítica insultante. Los no narcisistas (fuese alta o fuese baja su autoestima) se revelaron bastante menos agresivos, lo mismo que los narcisistas que habían sido alabados.

En un segundo estudio, volvimos a obtener los mismos resultados y añadimos un nuevo giro: a algunos de los participantes se les dijo que iban a jugar al juego del tiempo de reacción contendiendo con una persona distinta de la que les había alabado o les había insultado. Sentíamos curiosidad acerca de la agresividad desorientada. ¿Se encolerizarían contra cualquier persona los sujetos enfadados por sus evaluaciones? Pues bien, no ocurrió eso, sino que los narcisistas estallaron contra quienes les habían insultado, pero no atacaron a ningún tercero inocente.

Un incidente revelador viene a explicar las actitudes de los narcisistas. Filmándose para la televisión un documental sobre este experimento, administramos el test a varios participantes adicionales en beneficio de las cámaras; uno de ellos resultó tener hasta un 98 % de narcisismo y fue de lo más agresivo durante toda la sesión. Cuando luego se le mostró la película y se le brindó la oportunidad de negarse a permitir que se proyectara en público, dijo que sí, que se proyectase: ¡estaba convencido de que allí era la suya una imagen de gran hombre! Entonces Bushman le llevó aparte y le explicó que probablemente no le gustaría que los televidentes de toda la nación le vieran como un narcisista muy agresivo, pues lo cierto era que en mucho metraje del film aparecía profiriendo palabrotas al recibir su puntuación y riéndose al enterarse de que había llegado a los más altos niveles de agresión permisibles. El tipo se encogió de hombros y reafirmó sonriendo que quería salir en la televisión. Y al proponerle Bushman que por lo menos en la proyección de la película se difuminara su rostro para ocultar su personalidad, el hombre repuso con un rotundo "¡No!". Y hasta añadió que su deseo era que en el programa se incluyesen su nombre y apellido y el número de su teléfono.

Del ensayo al mundo real

¿Correspondería lo averiguado en nuestros experimentos con la realidad del mundo exterior? En la vida real los violentos no son fáciles de estudiar, pero nosotros tuvimos acceso a dos grupos de encarcelados a los que se les había clasificado de criminales agresivos. Les dimos los mismos cuestionarios sobre la autoestima y el narcisismo. Cuando comparamos la autoestima de los reclusos con las normales en jóvenes adultos (la mayoría de ellos universitarios) hechas públicas a partir de dos docenas de estudios diferentes, la de los presos no se apartó mucho del promedio. En cuanto a narcisismo, sin embargo, los presos violentos dieron una puntuación media más alta que las de cualquier otra muestra publicada. Esa era la crucial característica que diferenciaba de los estudiantes universitarios a aquellos presos.

Ante tales resultados, cabe preguntarse: "Aunque las personas violentas vistas por fuera parezcan tener alta opinión de sí mismas, ¿no será eso solamente una pose? ¿No tendrán en realidad, interior-



3. AUTOESTIMA Y NARCISISMO no son rasgos iguales. Los individuos con alta autoestima no son necesariamente narcisistas. Pero, a la inversa, un alto grado de narcisismo con baja autoestima es rarísimo.

mente, baja estima de sí, aun cuando no quieran admitirlo?". Tal razonamiento adolece de un fallo lógico. Sabemos, por numerosos trabajos, que las personas que evidencian una autoestima baja no son agresivas. ¿Por qué la baja autoestima va a ser causa de agresión tan sólo al mantenerse oculta y no al ser manifiesta? La única diferencia entre la baja autoestima oculta y la baja autoestima manifiesta es la ocultación, y, si ésta es la diferencia clave, entonces la causa de la violencia no es la baja autoestima misma, sino el hecho de su ocultación. Y lo que la oculta es la máscara con que se encubre el egocentrismo..., lo cual nos trae de nuevo a la teoría del egocentrismo amenazado.

Varios investigadores han intentado sin éxito dar con algún indicio de que en el interior de las personas violentas haya un foco de inseguridad. Martin Sánchez-Jankowski, que convivió durante 10 años con varias pandillas y escribió uno de los estudios más completos sobre la vida de las bandas juveniles, hubo de decir: "Algunos estudios sugieren que muchos de los miembros de las bandas son externamente decididos y feroces brutos mientras que en su interior son inseguros. Esta sugerencia es errónea". Y Dan Olweus, de la Universidad de Bergen, que ha dedicado su carrera a investigar las baladronadas entre niños, reconoce que: "Contra una suposición bastante común entre los psicólogos y los psiquiatras, nosotros no hemos hallado indicios de que los chicos agresivos sufran angustia e inseguridad bajo una superficie de brutal rudeza".

La psicología no es aún experta en medir oscuros aspectos de la personalidad, sobre todo los que quizás uno no quiera aceptar para consigo. Pero, hoy por hoy, no hay ninguna prueba empírica ni razón teórica para afirmar que los agresores tengan en su interior un oculto núcleo de inseguridad y dudas de sí mismos.

Aunque esta conclusión contradice al tradicional enfoque sobre la baja autoestima, no pretende dar a entender que la agresión que comete un sujeto sea consecuencia directa de una opinión desmesurada de su valía. Los narcisistas, mientras nadie les insulta o critica, no son más agresivos que cualquier otra persona; pero cuando reciben un insulto —que podrá consistir en un comentario o un gesto aparentemente sin importancia y que a otra gente no le molestaría— su respuesta tiende a ser mucho más agresiva de lo normal. La fórmula del egocentrismo amenazado combina algo pertinente a la persona con algo pertinente a la situación. Sean cuales fueren los detalles de causa y efecto, ésta parece ser la más certera fórmula para predecir la violencia y la agresión.

Estos esbozos suscitan inquietudes respecto a cómo las escuelas y otros grupos tratan de estimular la autoestima basándose en ejercicios de sentirse bien. Una opinión favorable del propio ego puede poner a una persona a punto de dar fácil suelta a su agresividad, especialmente si esa favorable opinión es del todo injustificada. A mi entender, no hay nada malo en ayudar a que los estudiantes y otros jóvenes se enorgullezcan de sus buenas acciones y de sus éxitos, pero sí hay muchas razones para preocuparse cuando se anima a las personas a tener alta opinión de sí mismas sin que se la hayan ganado. Las alabanzas deberían ir vinculadas al cumplimiento de los deberes (incluso a las mejoras) y no deberían dispensarse gratis como si todo individuo tuviera derecho a ser alabado simplemente por ser quien es.

Bibliografía complementaria

RELATION OF THREATENED EGOTISM TO VIOLENCE AND AGRESSION: THE DARK SIDE OF HIGH SELF-ESTEEM. Roy F. Baumeister, L. Smart y J. M. Boden en *Psychological Review*, vol. 103, n.º 1, págs. 5-33; enero 1996.

EVIL: INSIDE HUMAN VIOLENCE AND CRUELTY. Roy F. Baumeister. W. H. Freeman, 1997.

THREATENED EGOTISM, NARCISSISM, SELF-ESTEEM AND DIRECT AND DISPLACED AGGRESSION: DOES SELF-LOVE OR SELF-HATE LEAD TO VIOLENCE? Brad J. Bushman y Roy F. Baumeister en *Journal of Personality and Social Psychologie*, vol. 75, n.º 1, págs. 219-229; julio 1998.

Wolfgang Bürger

El molinete de luz

A primera vista, el “molinete de luz” se parece a una bombilla puesta en pie. Pero su función no es la de iluminar. Expuesta al sol, o bajo el brillo de una lámpara de luz incandescente, gira un rotor en su interior, con un centro de giro de vidrio que hace de cojinete sobre la punta de un vástago. Las cuatro aspas son láminas cuadradas de mica o aluminio, pintadas de blanco en su cara anterior —en el sentido del giro— y de negro en la cara posterior. Cuanto más se iluminen, con mayor celeridad empujarán la rueda: un motor por radiación.

¿Se puede medir la intensidad de la radiación? En principio, sí; con el radiómetro, un medidor de radiación preciso y sensible, como también se designa al molinete. Pero la radiación actúa por un mecanismo complicado que intrigó durante decenios a físicos eminentes, James Clerk Maxwell y Albert Einstein entre ellos.

La prehistoria del tema se remonta a Augustin Jean Fresnel (1788-1827), físico e ingeniero menos recordado por sus experimentos de interferencia ópticos, demostrativos de la naturaleza ondulatoria de la luz, que por la invención de las lentes escalonadas, llamadas en su honor lentes de Fresnel. Nos referimos a esas lentes grandes y delgadas que concentran los haces de luz de los faros. Fresnel descubrió la fuerza del radiómetro en 1825. Pero la física de su tiempo no le permitía conocer la causa. Sí pudo, en cambio, con ayuda de experimentos realizados a diferentes presiones, rechazar algunas explicaciones: al molinete no lo mueven ni una corriente de gas que llena el espacio, ni un material que se evapora de las superficies calentadas.

El dispositivo lo inventó William Crookes (1832-1919), miembro de la Regia Sociedad de Londres desde 1863 y su presidente desde 1913. En 1861 descubrió el elemento químico talio, con número atómico 81, a través de su línea verde en el espectro. Cuando, doce años más tarde, se dedicó a determinar el peso atómico del nuevo elemento —sirviéndose de una balanza de vacío para pesar muestras a temperatura mayor que la del entorno— se percató de que el calor disminuía la atracción gravitatoria. Así redescubrió la fuerza del radiómetro. En la parte histórica de su trabajo de 1873 aludía a Fresnel, pero interpretó dicha fuerza como una enigmática atracción o repulsión producida por el calor.

Un efecto de la presión de la luz

¿Cuál es la causa de la fuerza del radiómetro? ¿Se trata de la presión de radiación de la luz, cuya existencia dedujo Maxwell a partir de las ecuaciones diferenciales del campo electromagnético en un trabajo publicado ese mismo año de 1873? Si, por mor de simplificación, aceptamos que las caras anteriores de las aspas del radiómetro —las claras— reflejan la radiación incidente, a manera de espejos perfectos, mientras que las caras posteriores —las oscuras— la absorben íntegramente, entonces, en virtud del principio de conservación del movimiento, la radiación tendría que ejercer sobre las caras blancas el doble de presión que sobre las oscuras. Por lo tanto, la presión de la luz debería hacer girar el molinete en sentido contrario al de los radiómetros comerciales.

Además, la fuerza de la presión de los rayos solares es demasiado pequeña para vencer la fricción que tiene lugar en el cojinete de agujas. Una fricción considerable; basta, para comprobarlo, girar horizontalmente el molinete entero y se observará que el ingenio, por el propio rozamiento del cojinete, alcanza un alto número de revoluciones.

Existen radiómetros inversos, impulsados por la presión de luz, que sólo se mueven cuando se ha eliminado casi del todo el gas de la ampolla, con altos vacíos de hasta 10^{-7} milibar de presión. El molinete, en vez de apoyarse en una punta de aguja, pende de un hilo de torsión largo y fino, que gira con facilidad.

El experimento crucial

La presión de radiación de la luz opera como una fuerza externa sobre las aspas del molinete, de forma parecida al viento que sopla sobre las velas de un velero. Si el molinete se propulsara con la presión de la luz, debería hacer girar consigo y en el mismo sentido —por la fricción del cojinete— al bulbo que lo contiene, suponiendo que la bombilla pudiera moverse con libertad. Si, por el contrario, la luz sólo calentara las aspas del molinete (aportaría energía sin propulsar, sin presionar con fuerza apreciable sobre las aspas), entonces el molinete giraría en el caso exclusivo de que se viera repelido por el bulbo. Además, habría un momento de retroceso que intentaría hacer girar la bombilla en sentido contrario.

Arthur Schuster, colaborador en Manchester de Osborne Reynolds (en cuyo homenaje hablamos del número de Reynolds), llevó a cabo en 1876 el experimento decisivo con un radiómetro que colgaba y podía girar libremente. El molinete y el bulbo de vidrio giraban en sentidos contrarios cuando eran irradiados. No es, pues, la presión de la luz lo que induce el movimiento de la rueda, sino un mecanismo interno del radiómetro.

La fuerza del radiómetro

Balance de los choques de las moléculas

Martin Knudsen estudió la fuerza del radiómetro en una rendija estrecha entre dos placas montadas fijamente. Calentó una hasta la temperatura T_1 y mantuvo la otra a temperatura ambiente T_2. Entre ambas colocó una placa móvil a temperatura T_2, que representaba el aspa del radiómetro. ¿Qué fuerza ejerce la corriente de las moléculas sobre ella? Por mor de simplificación podemos prescindir de la distribución de velocidades de las moléculas y suponer que todas las partículas tienen la misma velocidad v, la que corresponde a su temperatura T. En este caso la temperatura (absoluta) T y la presión p son proporcionales a la energía cinética $mv^2/2$ de las moléculas y, por ende, proporcionales al cuadrado de la velocidad. Para la presión vale $p = nmv^2/3$ y para la temperatura $T = mv^2/(3k)$. Aquí m es la masa de una partícula; n, la densidad de partículas, y k, la constante de Boltzmann; llamaremos v a la velocidad perpendicular a las placas. El factor 1/3 atiende a la repartición las diferentes direcciones en el cálculo de la velocidad.

Entre las placas a la misma temperatura T_2 hay una cantidad n_2 de partículas por unidad de volumen que pasan a una velocidad v_2 de una a otra placa, y la misma cantidad que se mueven en sentido contrario con la misma velocidad. La densidad de partículas por unidad de volumen es, por consiguiente, $n = 2n_2$. En el espacio intermedio entre las placas a diferente temperatura T_1 y T_2 se encuentran n_1 partículas por unidad de volumen que se dirigen hacia la placa móvil con una velocidad v_1, y n_2 partículas con velocidad v_2 que cursan en sentido contrario. Además, se desprecia la pequeña velocidad de la placa (o sea, la del aspa del molinete de luz). Si no han de acumularse las partículas en una de las placas, deberá entonces el mismo número de partículas recorrer el trayecto de ida que el de vuelta: $n_1v_1 = n_2v_2$. Si sucede que $v_1 > v_2$, entonces tiene que cumplirse que $n_1 < n_2$. Sobre la cara (negra) fuera del equilibrio del aspa del molinete las partículas absorbidas y emitidas ejercen conjuntamente la presión

$$p_1 + p_2 = \frac{mn_1v_1^2}{3} + \frac{mn_2v_2^2}{3} = \frac{mnv_2^2}{6}\left(\frac{v_1}{v_2} + 1\right)$$

mientras que sobre la cara en equilibrio la presión reinante es

$$p = 2p_2 = \frac{mnv_2^2}{3}$$

La diferencia $\Delta p = p_1 - p_2$ de las presiones empuja las aspas; la correspondiente fuerza del radiómetro es igual a Δp por la superficie de las aspas. Si se expresa Δp en función de la presión p del interior del radiómetro y de las dos temperaturas T_1 y T_2, se obtiene que

$$\Delta p = \frac{p}{2}\left(\sqrt{\frac{T_1}{T_2}} - 1\right).$$

Para pequeñas diferencias de temperatura $\Delta T = T_1 - T_2 \ll T_2$, la diferencia de presión es aproximadamente igual a $p\Delta T/(4T_2)$. Para los valores típicos $T_2 = 300$ kelvin y $\Delta T = 12$ kelvin se obtiene $\Delta p = p/100$.

Comparado con el efecto de la diferencia de temperaturas arriba calculada, el efecto ejercido por la presión de la luz es mucho menor: al tomar el sol nunca se tiene en cuenta la carga que supondría la radiación de los rayos solares. No se puede indicar una relación exacta entre ambas fuerzas, porque la presión debida a la cinética del gas y la debida a la presión de radiación no dependen igual de la intensidad de la radiación.

Otra comparación nos será más ilustrativa de la presión de radiación. La gran vela solar de una nave espacial, que surca con la luz solar en el borde de la atmósfera terrestre, debería notar una fuerza del Sol mensurable. ¿Qué superficie tiene que tener la vela para que la presión de la luz de los rayos solares le imparta un empuje de 10 newton (redondeando, el peso de un kilo)?

Las radiaciones electromagnéticas de intensidad S ejercen una presión (fuerza por área)

$$p_s = \frac{S}{c}(1 + r)$$

sobre una superficie perpendicular a la dirección de incidencia (el coeficiente de reflexión r de la superficie está entre 0 y 1; c es la velocidad de la luz). El Sol irradia con una intensidad $S = 8$ joule por minuto y metro cuadrado (la así llamada constante solar), la velocidad de la luz es $c = 3 \times 10^8$ metros por segundo. Si la vela solar fuera un reflector ideal ($r = 1$), se obtendría para la presión de radiación $p_s = 2S/c \approx 0{,}9 \times 10^{-5}$ newton por metro cuadrado. Para un empuje de 10 newton se necesita una vela de más de un kilómetro cuadrado de superficie: $A = 1{,}125$ km^2.



Bajo la radiación de la luz incidente se mueven sin cesar las aspas del molinete de luz, con la cara clara hacia delante

La corriente de moléculas

La explicación teórica se torna más sencilla si suponemos un recorrido medio libre de las moléculas de aire de tal magnitud, que puedan despreciarse las interacciones intermoleculares. Así sucede con una presión máxima entre 10^{-3} y 10^{-2} milibar. Las moléculas del aire crepitan en su movimiento térmico a ambos lados de las caras de las aspas. Mas, por término medio, abandonan el lado oscuro y más caliente con una velocidad mayor y le proporcionan, en consecuencia, una fuerza de retroceso apenas mayor. Esta diferencia en las fuerzas de choque pone en movimiento al molinete, con las caras blancas hacia delante.

A partir de estas reflexiones, el físico Martin Knudsen (1871-1949) dedujo una fórmula para el medidor de radiación (*véase el recuadro*): la fuerza del radiómetro por unidad de área en un aspa es proporcional a la presión del gas y depende sólo de la relación entre las temperaturas de la cara oscura y del entorno. Pero esta fórmula sólo vale para presiones más bajas que las que hay en los molinetes de luz comerciales.

Si se sube la presión del gas por encima de los 10^{-2} milibar, en las que aún dominan corrientes libres de moléculas, aumenta también la fuerza del radiómetro; alcanza sus mayores valores con presiones de diez a cien veces superiores. El efecto del radiómetro se ve reforzado con moléculas que, desde el borde de las aspas, emigran del lado más frío al más caliente ("arrastre térmico"). Se produce una fuerza creciente del radiómetro en los bordes de las aspas, fenómeno advertido ya por Maxwell y Reynolds y estudiado por los físicos de cinética de gases hasta fechas recientes.

Bajo condiciones externas constantes se acaba alcanzando una velocidad de rotación constante. Se trata, por supuesto, de la velocidad en la que la fuerza del radiómetro y la de fricción se hallan en equilibrio.

En los radiómetros corrientes se observan también giros en sentido contrario. Puede, sin duda, bajar la temperatura de las superficies oscuras más que la del entorno. No hace falta medir la temperatura del interior del radiómetro para deducir el momento de rotación, que actúa sólo a partir de las aceleraciones del molinete; y las temperaturas, a partir del momento de rotación.

Para que el molinete gire en sentido contrario durante un breve intervalo de tiempo, hay que trasladar el radiómetro giratorio a una zona umbría donde pueda enfriarse por irradiación; se para el molinete con ayuda de la fuerza de fricción del cojinete aplicando cautos movimientos en sentido contrario al del giro. De manera sorprendente, pasa del estado de reposo al de movimiento y gira durante algunos segundos en sentido contrario. Tiene que haber intervenido, por tanto, un momento de rotación transitorio que lo ha impulsado hacia atrás. Puesto que las superficies oscuras se calientan más deprisa por la radiación, también se enfrían con celeridad mayor por irradiación. Algunos autores han informado sobre giros en sentido contrario durante varios minutos en molinetes de luz instalados en el frigorífico o bajo la aplicación de un vaporizador de enfriamiento. No lo puedo confirmar con mis molinetes de luz.

Los molinetes de aficionados, de papel de aluminio que penden de un hilo fino, giran, bajo el brillo de una lámpara de luz incandescente a presión atmosférica, de forma algo imprevisible, una vez en un sentido y otra vez en otro. No varían las cosas si oscurecemos las aspas por un lado. Para aumentar su rendimiento pondremos oblicuas las aspas. Se verá así que este "molinete de luz" es en realidad una turbina de viento convectivo, que se mueve gracias al aire caliente ascensional. Los radiómetros genuinos funcionarían bajo "ingravidez" en un laboratorio espacial, mientras que este otro tipo de molinetes de luz fallaría en tal circunstancia.

Aventuras problemáticas

Dennis E. Shasha

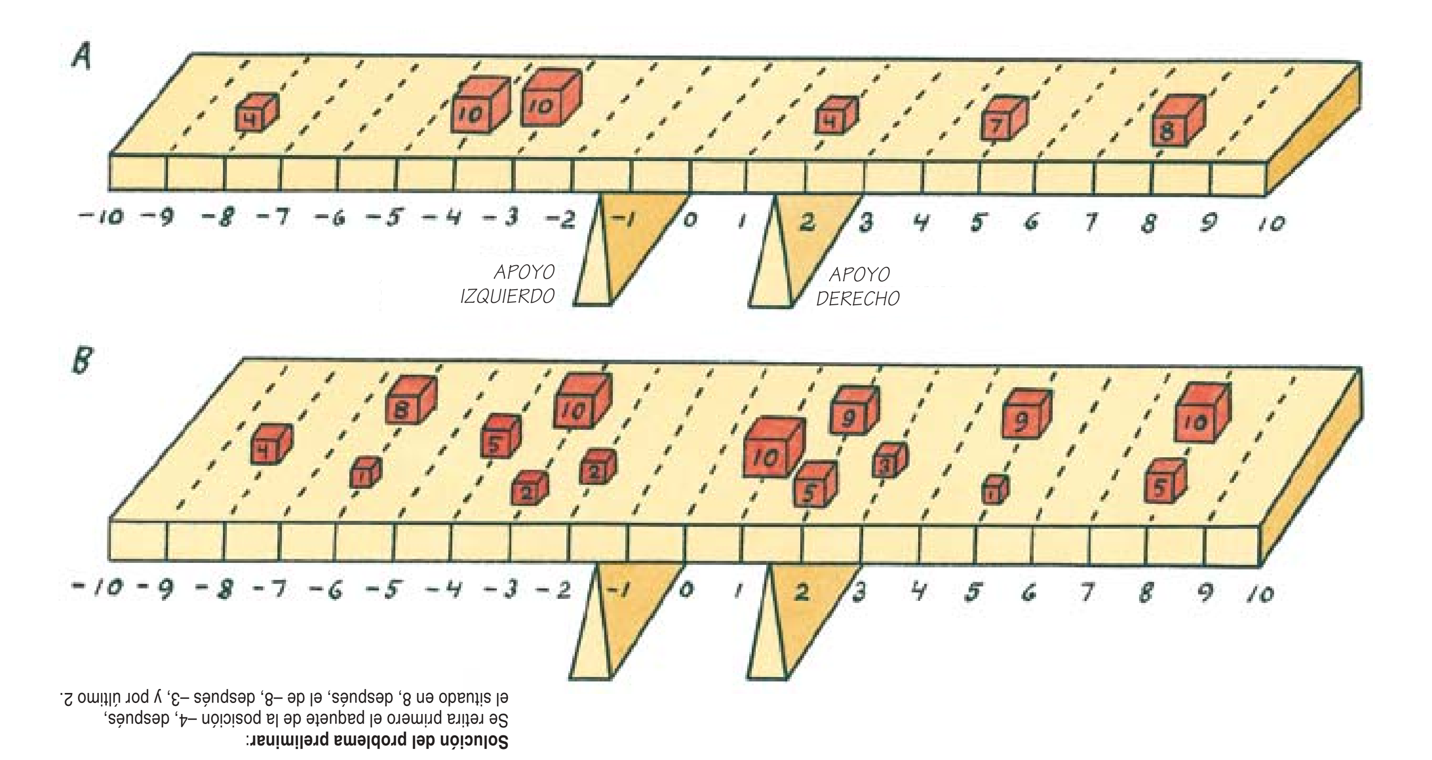
Sin caída

Como Arquímedes hizo notar, un objeto situado en uno de los brazos de una palanca ejercerá una "fuerza" de torsión tendente a hacerla girar en torno al punto de apoyo. En física, esta torsión se llama "momento" y es igual al producto del peso del objeto por su distancia al fulcro o punto de apoyo. (También interviene el ángulo de la palanca, pero aquí no será necesario tenerlo en cuenta.) Si el objeto se encuentra a la izquierda del fulcro, el momento es antihorario o "levógiro"; si a la derecha, horario o "dextrógiro". Para calcular el momento total respecto a un apoyo, basta sumar los momentos de todos los objetos individuales que se hayan colocado en la palanca.

El problema consiste en lograr que la palanca se mantenga en equilibrio mientras se ajustan los objetos colocados sobre ella. A modo de calentamiento, probemos suerte con un problema preliminar: Supongamos un larguero recto, perfectamente rígido, de 20 metros de longitud y 3 kilos de peso, uniforme en toda su longitud. El centro de masa del larguero está en su punto medio; tal posición será llamada 0 y tomada como origen. De esta forma, las posiciones de un objeto sobre el larguero podrán ir desde –10 (extremo izquierdo) hasta +10 (extremo derecho). El larguero está sostenido en dos puntos por dos apoyos iguales, situados en las posiciones –1,5 y +1,5. Estos soportes tienen una altura de 2 metros y se alzan sobre una superficie plana. Sobre el larguero se encuentran 6 paquetes, en las posiciones –8, –4, –3, 2, 5 y 8, cuyos pesos respectivos son 4, 10, 10, 4, 7 y 8 kilos, respectivamente (*ilustración A*).

La tarea consiste en ir retirando los paquetes de uno en uno, de modo que el larguero descanse siempre sobre los dos apoyos, sin caer hacia uno u otro lado. El larguero se inclinará si el momento total respecto al fulcro izquierdo (resultante de los pesos de los paquetes y del propio larguero) tuviera sentido contrario antihorario, o levógiro, o si el momento total con respecto al apoyo derecho tuviera el sentido horario, o dextrógiro. Se da una solución (existen varias).

Y ahora un problema un poco más difícil. Supongamos que haya 15 paquetes en ese mismo larguero, con las posiciones y pesos indicadas en la ilustración B. Hay paquetes que se encuentran a la misma distancia del centro del tablero, uno al lado del otro. Hállese un orden en el que ir retirando los paquetes sin que el larguero se desequilibre en ningún momento. Una de las soluciones (lo mismo que antes, existen varias) aparecerá en la columna del mes que viene.



Solución del problema preliminar:
Se retira primero el paquete de la posición –4, después, el situado en 8, después, el de –8, después –3, y por último 2.

Manuel M.ª Ritoré Cortés

Geometría de las pompas de jabón

¿Por qué las pompas de jabón son esféricas? ¿Por qué, cuando dos de ellas se juntan, la doble pompa originada presenta una configuración especial? ¿Existen leyes que determinen las formas que pueden adoptar?

Uno de los primeros científicos que estudiaron y describieron estos fenómenos fue el físico belga J. Plateau, quien observó en el siglo XIX que las agrupaciones de pompas verificaban los siguientes principios: están formadas por películas de jabón que se cortan; además, o bien tres de estas películas se cortan a lo largo de una curva, o bien cuatro de estas curvas (y seis superficies) se encuentran en un punto; por último, cuando tres películas se cortan en una curva, tienden entre ellas ángulos iguales de 120º, y cuando cuatro de estas curvas se unen en un punto, lo hacen formando ángulos de 109º 28'.

Estas reglas indican cómo se disponen las superficies de jabón, pero no qué posibles formas pueden adquirir. Para que una película de jabón se encuentre en reposo, la tensión superficial debe equilibrar la presión que ejerce el aire a ambos lados. Como la tensión superficial puede considerarse constante, la ecuación de Young-Laplace implica que la curvatura media de la pompa de jabón (una característica geométrica de la superficie) es constante. Las esferas, los cilindros circulares rectos y los planos son ejemplos de superficies con curvatura media constante, aunque existen muchos otros.

Cuando una asociación de pompas se ha formado, debe tener la menor energía libre posible. Bajo supuestos físicos razonables, dicha energía presenta una componente que depende del área de las superficies de jabón y otra que depende de los volúmenes encerrados (existe una componente gravitatoria que se ignora debido a la escasa masa de la configuración). Suponiendo que los volúmenes de aire encerrado son constantes, el factor dominante en la energía es el área de las películas de jabón.

Podemos entonces plantear el siguiente modelo matemático: una agrupación de pompas es una configuración de superficies que encierran una o más regiones, y cuya área no disminuye al aplicar una pequeña deformación de modo que el volumen encerrado en cada región permanezca constante.

Partiendo de este modelo, F. Almgren y J. Taylor probaron en los años setenta del siglo pasado que existe solución a este difícil problema y que consiste en una configuración de superficies con curvatura media constante que se comportan siguiendo los principios de Plateau. Además, en el caso de varios volúmenes encerrados, las tensiones superficiales (o las curvaturas medias) no son arbitrarias. Es decir, partiendo de la hipótesis de que las agrupaciones de pompas minimizan el área localmente manteniendo fijos los volúmenes encerrados, se obtienen tanto las reglas experimentales observadas por Plateau como la condición de que las curvaturas medias de las superficies que forman las pompas deben ser constantes (y están relacionadas).

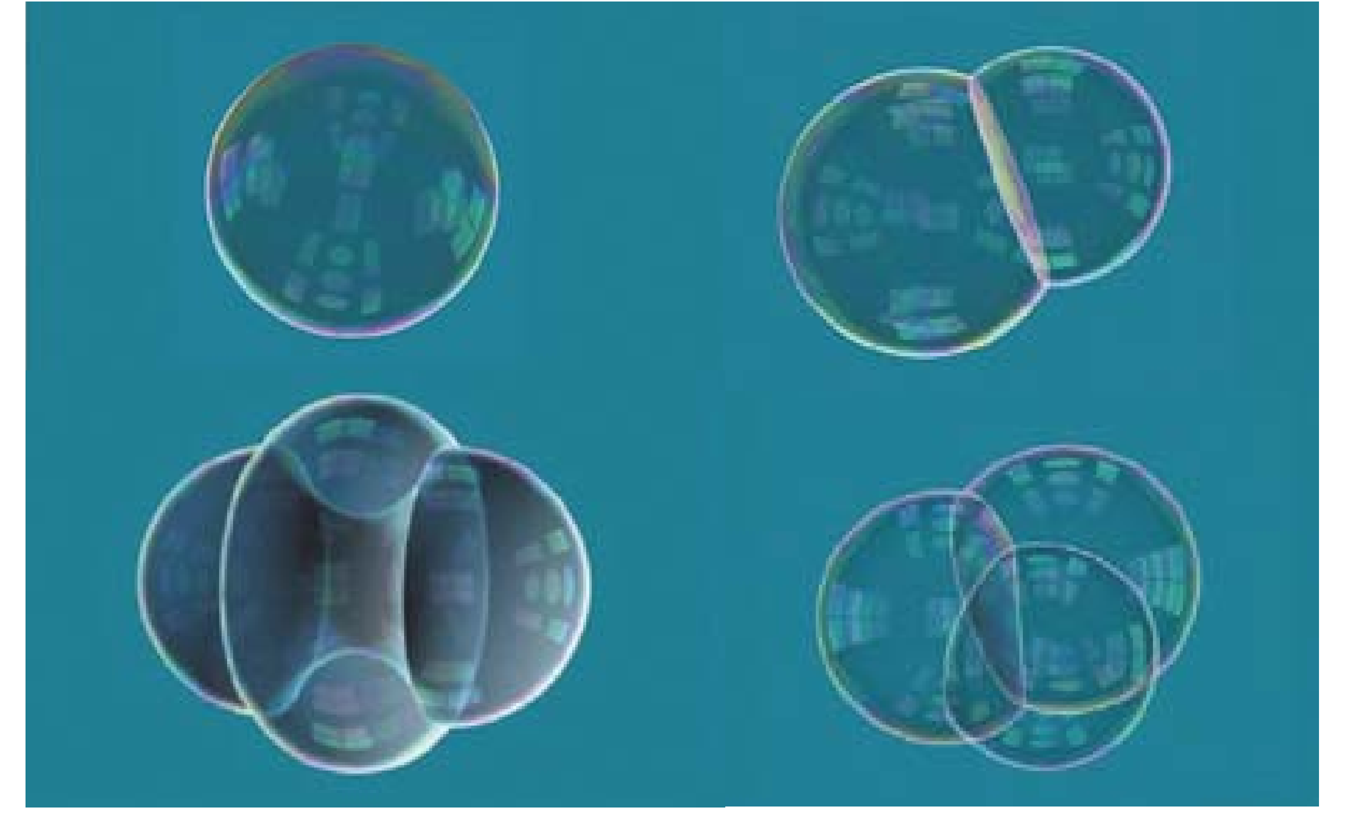


1. Muchacho soplando pompas de jabón (óleo de Chardin)

Cuando se forma una pompa, ésta es siempre esférica. De acuerdo con el modelo planteado, la esfera debería ser la única superficie que encierra un volumen dado con la menor área posible. Esta propiedad isoperimétrica de la esfera fue demostrada por H. Schwarz en 1884, aunque estudios del problema existen desde tiempos inmemoriales.

Si consideramos dos volúmenes arbitrarios, existe una doble pompa que verifica todas las condiciones para ser una solución del problema de minimización, la doble pompa usual constituida por tres piezas de esferas de la figura 3. No obstante, no hay objeción matemática a la existencia de otro tipo de soluciones. No se realizó ningún progreso en el problema hasta 1995, cuando tres matemáticos norteamericanos probaron que, en el caso de volúmenes *iguales*, la única solución que verifica el modelo matemático es la doble pompa usual. El método de trabajo consistió en realizar una drástica reducción del número de posibles soluciones por argumentos geométricos, y descartar las restantes posibilidades por medio de un cálculo realizado por ordenador.

En marzo de 2000, un equipo integrado por dos matemáticos norteamericanos y dos españoles consiguió probar que la única solución del problema de minimización para un par *arbitrario* de volúmenes era, de nuevo, una doble pompa usual. El método de demostración es distinto, y consiste en la construcción de deformaciones lo-



2. Una pompa esférica, una doble pompa y una triple pompa (en el sentido de las agujas del reloj). En las dos últimas, las películas de jabón se unen siguiendo las reglas de Plateau. La restante doble pompa no puede aparecer en la naturaleza, puesto que no minimiza el área con volúmenes encerrados fijos. Su eliminación ocupa la parte central del trabajo de clasificación de 1996. (Cortesía de John Sullivan)

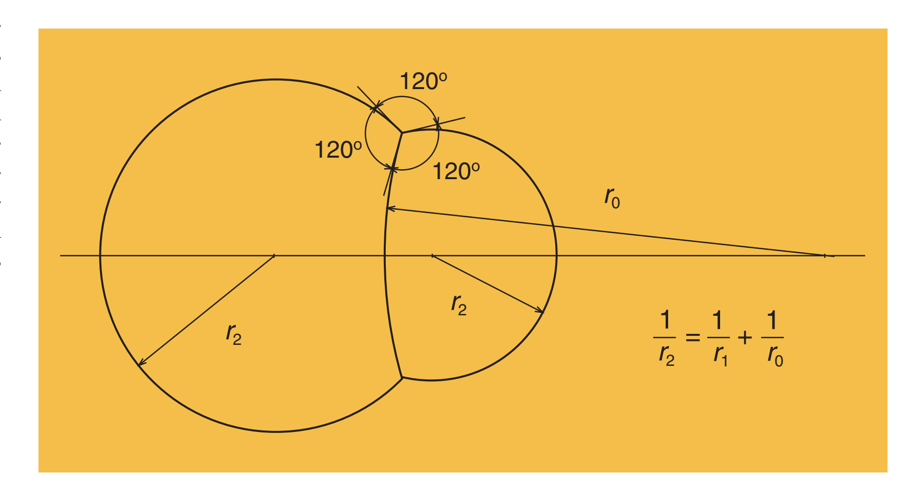
cales que incrementan el área de la pompa manteniendo fijos los volúmenes encerrados, salvo que la pompa inicial sea la usual.

¿Qué soluciones hay cuando se consideran agrupaciones de pompas que encierran tres o más volúmenes? En este momento el problema permanece abierto, y ni siquiera disponemos de una conjetura clara de qué ocurre en estos casos. La demostración en el caso de dos volúmenes presenta simplificaciones técnicas que no pueden aplicarse para el estudio de tres o más volúmenes.

El estudio de películas y pompas de jabón es parte de la ciencia de fenómenos superficiales. Los resultados que se obtienen pueden servir como modelos razonables en ciertas situaciones. Algunas membranas de animales y plantas unicelulares están formadas por moléculas de lípidos que se comportan de un modo similar a las películas de jabón. Dos sustancias incompresibles se separan a veces naturalmente por medio de una superficie. Bajo condiciones óptimas, el factor dominante que determina la forma de la superficie de separación es la minimización del área de dicha superficie. De nuevo en este caso aparecen superficies con curvatura media constante (esferas, cilindros, planos y algunas otras más complicadas).

En un libro titulado *On growth and form*, D'Arcy Thompson describe las formas de algunos seres marinos que constan de una cubierta rellena de fluido orgánico. La cubierta no es rígida y está sometida a presiones desde el interior y el exterior que serán, en general, variables, por lo que la curvatura media de la cubierta no será constante. No obstante, es sorprendente observar cómo la forma de estos seres vivos es similar a la de algunas superficies con curvatura media constante.

Los lectores interesados en el trabajo de clasificación de pompas dobles encontrarán más detalles en http://www.ugr.es/~ritore/bubble/bubble.htm.



3. La doble pompa usual se obtiene rotando los círculos alrededor del eje horizontal. Si $r_1 = r_2$, $r_0 = \infty$ y la superficie que separa los dos volúmenes es un disco

Mark Fischetti

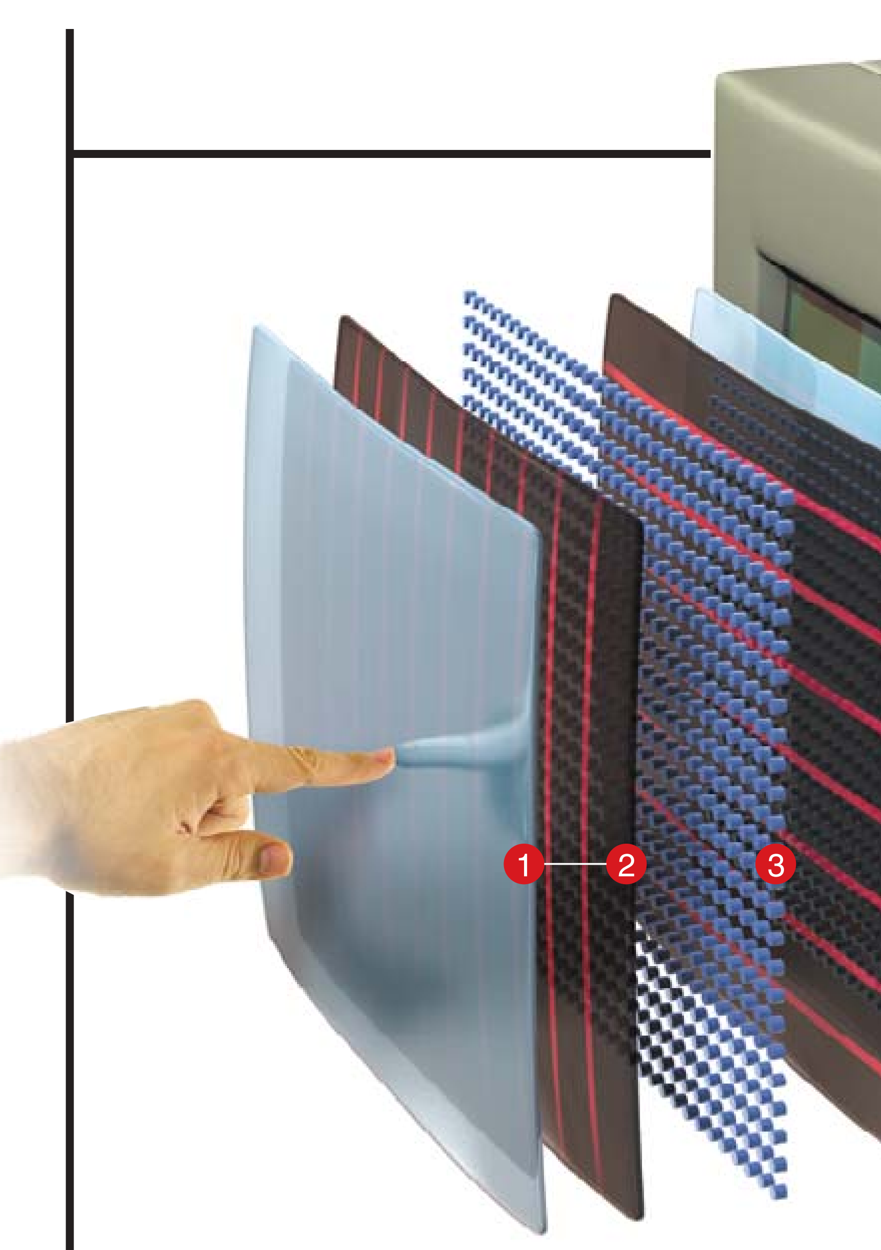
Pantallas táctiles

Las pantallas táctiles se hallan por doquier: en los puntos de información turística, cajeros automáticos o en controles industriales. Mueven un negocio billonario.

En atención al modo en que se detecta el punto de contacto se distinguen tres tipos de pantallas táctiles. Al oprimir un modelo "resistivo" con un dedo u otro objeto aguzado se genera una tensión eléctrica. En las pantallas "capacitivas", la presión del dedo produce una minúscula corriente (método muy empleado en las almohadillas de los ordenadores portátiles). En otros modelos, el dedo o lo que haga de punzón interrumpe un campo de ondas acústicas o de luz infrarroja que cubre la superficie.

Las pantallas resistivas son las más antiguas. Funcionan con cualquier objeto aguzado (un dedo, una pluma). Para que produzcan corriente, a las pantallas capacitivas hay que rozarlas con un dedo o con un punzón puesto a tierra. Las pantallas de ondas han sido las últimas en llegar. Las pantallas de ondas acústicas superficiales deben tocarse con un dedo o un objeto aguzado blando, tal como una goma de borrar de lápiz, para que absorban energía; las infrarrojas funcionan con cualquier objeto aguzado. Estas técnicas diferentes pueden emplearse en las mismas aplicaciones, aunque la consideración de pros y contras lleva a ciertos usos; así, para controles industriales y centradores manuales se prefieren las pantallas resistivas, las capacitivas para máquinas tragaperras y las ondulatorias para cajeros automáticos y expendedoras de interior.

La mayoría de la gente no se da cuenta del tipo de máquina que usa. Pero algún truco puede ayudarnos. Presiónese levemente la pantalla con la uña (no con la piel). Si responde, la máquina podría ser resistiva o infrarroja. En tal caso, colóquense a la vez dos dedos separados sobre la pantalla. Si el cursor se mueve bajo un dedo, la máquina es infrarroja (el software registra el primer contacto); si el cursor se mueve entre los dedos, es resistiva (se promedian los puntos). Si la máquina no responde a la uña, también se colocarán a la vez dos dedos separados sobre la pantalla. Si el cursor se mueve bajo un dedo, la máquina es acústica, y si se mueve entre los dedos, es capacitiva.



1. PANTALLAS RESISTIVAS. Un panel de vidrio que descansa sobre un tubo de rayos catódicos (TRC) o sobre una pantalla de cristal líquido (PCL) está cubierto de una sustancia conductora. Hay unos pequeños espaciadores de poliéster que lo separan de una lámina protectora de poliéster cuya superficie interna porta una capa de metal conductor. Un controlador aplica un ligero gradiente de tensión eléctrica a lo largo del eje *x* del panel y del eje y de la lámina protectora. Cuando un objeto aguzado oprime una contra otra las capas conductoras, los circuitos electrónicos de control detectan las coordenadas *x* e *y*.

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **MARIPOSAS Y PERFORACIONES.** El recuento de votos durante las recientes elecciones presidenciales norteamericanas podría haber evitado el fiasco si en Florida se hubieran empleado máquinas de votar de pantalla táctil, en vez de las desconcertantes papeletas mariposa y las poco fiables tarjetas perforadas. Varios fabricantes pretenden modernizar la situación. Global Election Systems ha publicado un informe donde afirma interesadamente que "las elecciones han creado numerosas oportunidades nuevas para vender sistemas de votación". La empresa ya suministra a 850 circunscripciones en todo el país. ¿Nombre del producto? AccuVote ("Voto-fiel").

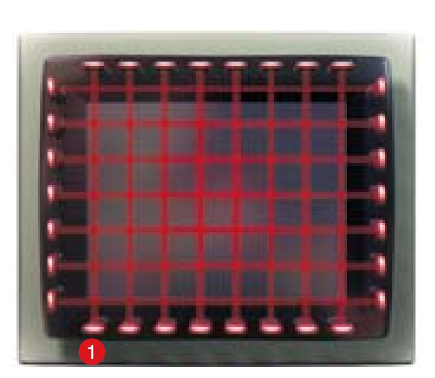
➤ **DELFINES.** El biólogo Ken Marten, del Parque Marino de Hawai, utiliza una pantalla táctil infrarroja submarina (construida por Carroll Touch) y un ordenador Macintosh G64 para crear un lenguaje entre especies. El ordenador genera silbidos y chasquidos similares a los de los delfines. Estos mamíferos tocan imágenes con sus morros. Cuando un animal imita al sonido que el ordenador emite para indicar "arriba" y entonces nada hacia arriba, ha nacido un bit de lenguaje. A los delfines no se les premia con alimentos, sólo con sonidos e imágenes grabadas que ellos encuentran intelectualmente estimulantes.

➤ **TV TACTIL.** Bill Colwell, ingeniero de Elo Touch-Systems, desarrolló en 1977 la primera pantalla táctil. Para la comercialización de aquel modelo resistivo fue crucial la consiguiente patente Elo de los "cilindritos" de poliéster para separar las capas de la pantalla.

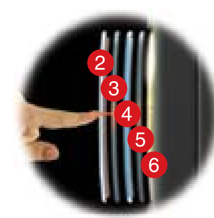


1 Lámina protectora de poliéster con capa antirrayado
2 Capa conductora
3 Espaciadores
4 Capa conductora
5 Panel de vidrio
6 TCR/PCL

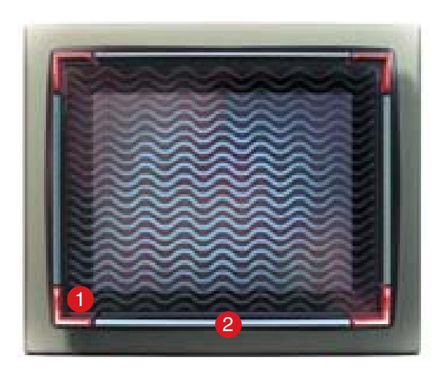
2. PANTALLAS CAPACITIVAS. Una hoja de vidrio tiene ambas caras cubiertas de una sustancia conductora. La superficie externa se protege con una capa antirrayado. Los electrodos que rodean el borde del panel distribuyen un campo eléctrico de baja intensidad uniformemente sobre la capa conductora externa. (La capa interna proporciona el apantallado y el antiparasitado.) Cuando un dedo toca la pantalla, produce un efecto capacidad con la tensión eléctrica y se genera una minúscula corriente. Los electrodos miden la intensidad de esa corriente desde las esquinas y el controlador determina las coordenadas del dedo.



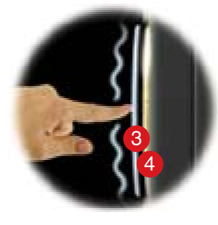
1 Electrodos
2 Capa antirrayado
3 Capa conductora
4 Panel de vidrio
5 Capa conductora
6 TCR/PCL



3. PANTALLAS DE ONDA ACUSTICA SUPERFICIAL (E INFRARROJAS). La pantalla es un panel de vidrio sin revestir. Los transductores de las esquinas convierten la señal procedente de un controlador en ondas acústicas que viajan por la superficie del vidrio. Los reflectores de los bordes crean una configuración de ondas estacionarias. Cuando un objeto aguzado blando toca la pantalla, absorbe parte de las ondas. Los transductores perciben esa atenuación y el controlador determina las coordenadas del objeto. En las pantallas infrarrojas, diminutos diodos emisores de luz y fototransistores dispuestos en los bordes establecen un retículo estacionario de rayos infrarrojos invisibles; el punzón obstruirá el haz.



1 Transductores
2 Reflectores
3 Panel de vidrio
4 TCR/PCL



NEXOS

James Burke

¿Qué encierra el nombre?

No hace mucho, mientras recorría la Institución Smithsoniana de Washington, auténtico tesoro de historia de la técnica, recordé que la evolución hizo de nosotros el único animal del planeta con una apreciación consciente de su propio pasado.

Ahí podía esconderse la razón de que, en 1801, James Macie, aficionado a la ciencia e hijo ilegítimo del duque de Northumberland, se apropiara del apellido aristocrático cuando a la muerte de su padre no quedaba nadie que se lo impidiera. Dos hazañas notables le hacen acreedor de la fama: a) escribió una de esas prescindibles monografías sobre el zumo de caña de bambú y b), perfeccionó la técnica de preparación del café. Su elección como miembro de la prestigiosa Regia Sociedad se debió con mayor probabilidad a la influencia de un amigo inmensamente rico y descubridor del hidrógeno. Henry Cavendish, el poderoso de marras, tomó a Macie bajo su protección y le dio vía libre para utilizar su laboratorio privado de Londres.

Cavendish tenía una obsesión histórica: vestirse con ropa de la época de su abuelo. También se vio atrapado en una de esas disputas relativas a la primacía del descubrimiento, en su caso el de la composición del agua. Todo se debió al error en la transcripción de la fecha de un artículo que escribió en 1783, "Experimentos sobre el aire", y que la Regia Sociedad fechó con un año de retraso. Como entonces hasta los niños investigaban sobre el tema, el error de la academia londinense derivó en acusación. Ni más ni menos se culpaba a Cavendish de haber plagiado otro artículo, similar, firmado por James Watt. Al final, Cavendish y Watt dirimieron la disputa en un ágape. Watt regresó a sus máquinas de vapor en la fábrica de Birmingham cuya propiedad compartía con Matthew Boulton.

En 1777 Boulton atendió la oferta de William Murdock. De ese modo contó con los servicios de un hombre diestro con el torno e inventor del sistema de transmisión giratorio, como el de un planeta alrededor del Sol; transformó los impulsos de avance y retroceso de la bomba de vapor de Watt en el movimiento rotatorio que gobernaría la engrasada máquina de la revolución industrial. Andando el tiempo, endureció el trabajo de la revolución al implantar un turno de noche. En 1802, gracias a un proceso con el que Murdock había estado experimentando durante once años, la empresa Soho Engineering Works de Boulton y Watt fue la primera instalación industrial que funcionó, a pesar de su hedor, con el nuevo gas de carbón.

Espectacular partido le sacaría al asunto, 52 años después, un químico de Heidelberg. Andaba éste buscando una llama libre de impurezas malolientes. En realidad a Robert Bunsen le fascinaba cuanto despedía humos, fueran los volcanes de Islandia o las chimeneas de las fábricas alemanas. Especialmente candente era su interés por el reciclaje del calor que se perdía por las chimeneas en las fundiciones de hierro. Su nombre debe resultar familiar a cualquier escolar que se haya pasado por el laboratorio. El mechero de Bunsen que inventó produce una llama no luminosa de gas de hulla, cuya única impureza es la que uno escoja para quemar con ella. De hecho, Bunsen probó varias sustancias ayudado por su segundo, Gustav Kirchhoff, quien le proporcionó la idea.



Como suele suceder, Kirchhoff recogió a su vez la idea de otro, el óptico Joseph von Fraunhofer. Décadas antes, von Fraunhofer había proyectado luz a través de lentes en busca de imperfecciones, utilizando las líneas finas y oscuras del arco iris que aparecían cuando el haz atravesaba un prisma; los defectos provocaban las ondulaciones y difuminaciones de las líneas. Kirchhoff y Bunsen emplearon el mechero de Bunsen como fuente de luz y lo aplicaron a todo. El resultado de toda esta conflagración fue, entre otras cosas, el descubrimiento del cesio y del rubidio. En la actualidad se denomina espectroscopía a lo que ellos estaban creando. Si se pasa la luz que crea una sustancia candente a través de un prisma, se observan unas líneas oscuras en el espectro resultante, con un juego de frecuencias (o colores) único para cada sustancia quemada. Basta con comparar las líneas obtenidas con ciertas tablas para saber de qué material se trata. Si no existe nada igual, quiere decir que hemos descubierto algo nuevo. Todo lo que se requiere para llevar a cabo este truco es una mínima cantidad de los materiales que se desea identificar.

Este último hecho fascinó, en 1864, al británico Henry Sorby.

Viajaba éste siempre en compañía de su madre. Sorby, un portento para las cosas menudas, inventó una técnica para cortar piedras en láminas tan finas, que se podía leer el periódico a través de ellas. Podía así examinarlas al microscopio y estudiar su formación. En cuanto supo lo que se cocía en el laboratorio de Bunsen en Heidelberg, amplió su campo de acción pegando un espectroscopio en el extremo de su microscopio y analizó los microconstituyentes de todo, desde sustancias tóxicas hasta hojas otoñales. Mientras observaba con fruición estas últimas, Sorby descubrió la molécula que les confiere ese matiz romántico: el caroteno, pigmento responsable de la coloración de casi todo lo que es rojo-amarillo-naranja.

En 1876, Franz Boll, un profesor alemán que estudiaba en Roma la retina de las ranas, topó con el mismo material cuando halló el pigmento que permite al ojo ver en condiciones ambientales extremas, con luz brillante o con luz tenue. Boll descubrió que la luz intensa activa los bastoncillos de la retina sensibles a la luz, al pasar del rojo púrpura al naranja y finalmente al blanco. Exámenes posteriores revelaron que, cuando la luz se atenúa, la sustancia que invierte el proceso es otra forma de caroteno. Mientras tanto Boll se desplazó a Berlín, para presentar su trabajo a Ernst Pringsheim y otras eminencias.

A Pringsheim le absorbía la física de las radiaciones y, en particular, los rayos infrarrojos. Desarrolló una versión especial del radiómetro, un instrumento medidor de la energía radiante. El radiómetro (el molinete de luz) fue inventado por un fino experimentalista victoriano, Sir William Crookes. Constaba de cuatro aspas pequeñas, ennegrecidas de hollín por uno de los lados, sujetas a unos ejes cruzados que se balanceaban delicadamente sobre un vástago de acero que se sostenía en una copa. El conjunto se incluía en una campana de cristal en la que se había hecho el vacío. Cuando se le aproximaba una luz, las palas empezaban a girar, comportamiento que Crookes (y la mayoría, incluido Pringsheim) atribuían al golpe de las partículas de luz contra las aspas negras. Nada más falso, como demostraría el experto británico en fluidos Osborne Reynolds. Lo que realmente sucedía era que, al calentarse la parte oscura de las aspas, se expandían y escapaban pequeñas cantidades de gas atrapadas en el hollín. Era el gas y no la luz lo que provocaba el impulso. Tras la demostración, la palidez de los demás fue más que infrarroja.

Crookes siguió imperturbable y ocupado en otras investigaciones. Amén de inventar el tubo de rayos catódicos y de ser elegido presidente de la Regia Sociedad, ofrecía sus servicios como asesor químico. Al fin y al cabo tenía diez bocas que alimentar. Crookes presentaba otra vertiente, menos pública. Adquirió los poderes de un fantasma llamado Katie King. Esta dama aparecería durante una reunión de espiritismo, donde fue fotografiada abrazada con el apasionado inventor, quien también era testigo frecuente de otros fenómenos paranormales, como acordeones que tocaban solos o jarros de agua que levitaban.

La fascinación de Crookes por el espiritismo era compartida por muchos contemporáneos. Entre otros, por Alfred Russel Wallace, cuyos escritos sobre el tema gozaban ya de extendido predicamento. Menos conocido era el principal objeto de su interés: el archipiélago malayo, donde pasó varios años y en el que identificó una peculiar línea divisoria. Al este y al oeste de dicha línea parecía haber especies muy distintas entre sí. Como parte de las investigaciones de este fenómeno insólito formuló una teoría de la vida que le hubiera situado en lo alto de la escena científica si no hubiera sido por su modesta naturaleza. Se dejó convencer para que fuera otro naturalista, que había llegado a las mismas conclusiones, el que leyera un artículo firmado por ambos ante la Sociedad Linneana de Londres y publicara sus tesis en formato de libro. La publicación sacudió al mundo de la historia natural desde sus raíces, pero sólo llevaba el nombre del otro tipo.

Esta es la razón por la que, al principio de este artículo, mis pensamientos en la Institución Smithsonian sobre la evolución fueron "darwinianos" y no "wallacianos". Y también el motivo por el que he empezado hablando de James Macie. Fue el joven que proporcionó los fondos para la fundación de la Institución Smithsoniana y que perpetuaría su orgulloso sentido de la historia. El apellido que Macie adoptó a la muerte de su padre, duque, fue el de Smithson.

LIBROS

De Bagdad a Oxford

Vía Chartres

IBRAHIM IBN SINAN: LOGIQUE ET GÉOMÉTRIE AU X^E SIÈCLE, por Roshdi Rashed y Hélène Bellosta. Brill; Leiden, 2000.

LE "LIBER ACCIPITRUM" DE GRIMALDUS: UN TRAITÉ D'AUTOURSERIE DU HAUT MOYEN ÂGE. Texto preparado, traducido y anotado por An Smets. Jacques Laget-Librairie des Arts et Métiers-Editions; Nogent-le-Roi, 1999. **GUILLELMI DE CONCHIS. GLOSAE SUPER BOETIUM.** Edición preparada por L. Nauta. Brepols Publishers; Turnhout, 1999. **WILLIAM OF CONCHES. A DIALOGUE ON NATURAL PHILOSOPHY (DRAGMATICON PHILOSOPHIAE).** Traducción al inglés, introducción y notas de Italo Ronca y Matthew Curr. University of Notre Dame; Notre Dame, 1997. **WOMEN'S HEALTHCARE IN THE MEDIEVAL WEST,** por Monica H. Green. Ashgate; Aldershot, 2000.

ARISTOTLE'S ANIMALS IN THE MIDDLE AGES AND RENAISSANCE. Dirigido por Carlos Steel, Guy Guldentops y Pieter Beullens; Leuven University Press; Lovaina, 1999. **ALBERTUS MAGNUS ON ANIMALS: A MEDIEVAL SUMMA ZOOLOGICA.** Traducido al inglés por Kenneth F. Kitchell, Jr., e Irven Michael Resnick. Introducción de William A. Wallace. Johns Hopkins University Press; Baltimore, 1999.

WAS IST PHILOSOPHIE IM MITTELALTER? Edición preparada por Jan A. Aertsen y Andreas Speer. Walter de Gruyter; Berlín, 1998.

El renacido interés por la ciencia medieval no ha brotado de ningún movimiento romántico, extasiado ante ruinas claustrales. Muy al contrario, procede con frialdad racionalista de cirujano. Y exige larga paciencia y aplicación tenaz para ir hilvanando suturas en un organismo cuya resistencia tiene en la lengua —árabe, hebreo, latín— su expresión más epidérmica y, en la matemática, (*Ibrahim Ibn Sinan*: *Logique et Géométrie au Xe Siècle*).

Fue Ibrahim ibn Sinan ibn Thabit ibn Qurra (909-946) nieto, hijo y hermano de médicos de los califas de Bagdad. En él convergían una tradición matemática plural, la de los algebristas, que nació con al-Khwarizmi y se prolonga con Abu Kamil, la de los geómetras al-Jawhari y al-Nayrizi que continúan la obra euclidiana, y la logicista de Thabit ibn Qurra. Aprovechándose de los trabajos de al-Hasan ibn Musa, maestro suyo, estudiará las transformaciones geométricas y sus aplicaciones a las secciones cónicas, así como a la medida del área de una sección de parábola.

En *La medida de la parábola*, Ibn Sinan, para reducir el número de lemas de 19 propuesto por su abuelo Thabit ibn Qurra a dos, procede, en efecto, por transformaciones geométricas, uniendo rigor, economía y elegancia. De ese mismo recurso metodológico se había valido ya con éxito en *Sobre el trazado de las tres secciones cónicas*, un tratado previo. Con las transformaciones, las cuestiones lógicas concernientes a la demostración se multiplican. Se impone limitar el número de construcciones auxiliares para que la síntesis sea en lo posible la inversa del análisis. Pero la geometría, aunque pasada por el tamiz de la lógica, persiste geometría.

El tratado de Ibn Sinan sobre *El método de análisis y síntesis en los problemas de geometría* conserva la huella de una preocupación extendida en la academia califal, pero sólo en ese libro se aborda de forma sistemática la cuestión. Aunque ceñido a la geometría, permite asociar un *ars inveniendi* con un *ars demonstrandi* en su descripción de la reversibilidad de las implicaciones. Clasifica las proposiciones matemáticas según el número de hipótesis y su compatibilidad, el número de soluciones y el tipo de demostración propia de cada clase. Reagrupa los problemas en dos grandes clases que comportan dos subclases cada una. La primera clase concierne a los problemas cuyas hipótesis vienen dadas de manera exhaustiva; comprende la primera subclase los problemas que tienen un número finito de soluciones, y la segunda subclase los problemas irresolubles. En la segunda clase agrupa los problemas que necesitan modificar algunas hipótesis; su primera subclase es la de los problemas con discusión (diorismo), y la segunda subclase la de los problemas indeterminados.

Contemporáneo de Ibn Sinan es el primer tratado latino de cetrería, que nos ha llegado de forma fragmentaria. Aunque originada en Oriente, la caza al vuelo fue práctica netamente europea desde las invasiones germánicas. De acuerdo con la ley sálica quien roba una rapaz debe pagar a los propietarios una suma de plata que varía de acuerdo con el lugar de la apropiación. Durante la época merovingia y carolingia, se acotan para halconesia vastos dominios, la *foresta*.

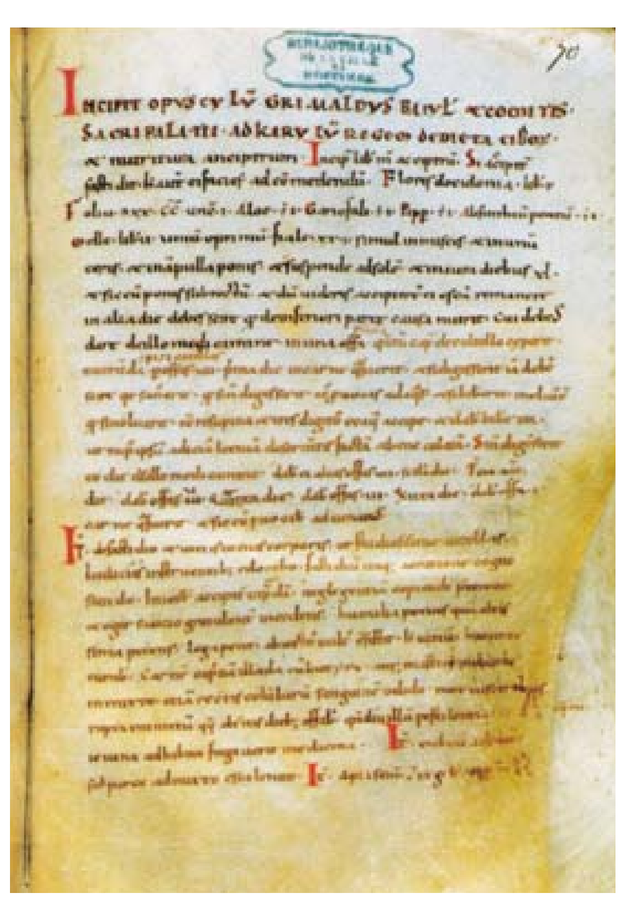
Los tratados de cetrería latinos alcanzan máximo esplendor en el siglo XII, cuando Adelardo de Bath compuso su famoso *De avibus tractatus*, sobre el azor. Le había precedido en poco el atribuido a un tal Grimaldo (*Le "Liber Accipitrum" de Grimaldus*), conservado en un solo manuscrito y publicado ahora por vez primera. En las páginas medievales "accipiter" no presenta un significado unívoco; unas veces designa el azor y otras cualquier ave rapaz. El escueto opúsculo de Grimaldo compila un elenco de recetas destinadas a sanar distintas afecciones del depredador. Pero el escrito esconde más información de lo que aparenta a primera vista. Con su centenar de sustancias médicas, sus medidas y posología,

constituye un pequeño tesoro para los interesados en la farmacopea medieval. Los textos médicos, centrados en patologías y parasitosis, pertenecen al período presalernitano.

La transición hacia la incorporación del saber griego que procede del mundo árabe, vía Salerno y España, se produce en la primera mitad del siglo XII (*Guillelmi de Conchis. Glosae super Boetium* y *William of Conches. A Dialogue on Natural Philosophy. Dragmaticon Philosophiae*.) Con otros centros, Chartres impulsa la lectura humanista de los textos clásicos, la interpretación racional de la naturaleza y un movimiento filosófico de corte platónico.

A la "escuela en Chartres" suelen ir asociados los nombres de Bernard de Chartres, Thierry de Chartres, Gibert de Poitiers y Guillermo de Conches. Nació este último hacia 1090, en Conches, cerca de Evreux, un país de cabezas de ovejas bajo el cielo gris de Normandía, como escribió en *Dragmaticon*. En esta obra, redactada entre 1144-1149, señala también que había dedicado 20 años a la enseñanza, docencia que comparte con la composición de comentarios a Boecio, Macrobio, Platón, Prisciano y, posiblemente, Martianus Capella. Más un tratado sistemático sobre filosofía natural, la *Philosophia*, sometido luego a profunda revisión en *Dragmaticon Philosophiae*.

Cuando redacta el comentario a Boecio, no parece familiarizado aún con el nuevo Aristóteles, autoridad frecuente en *Philosophia* y en sus glosas a Platón. La mayoría de los comentarios anteriores al siglo XII se daban en forma de glosas marginales o interlineales. Destacan en ese género las glosas a Boecio. Con el tiempo, las apostillas se van independizando del texto y forman un comentario trabado aparte. Pero con la llegada de tratados de matemática y astronomía árabes y griegos, los comentarios a la *Consolación* de Boecio, al *Timeo* de Platón o al *Sueño de Escipión* de Macrobio perdían sentido y consistencia. Petrus Alfonsi reclamaba sustituir los viejos glosarios por el estudio de la astronomía musulmana.



1. "Incipit" del Liber accipitrum *de Grimaldo, uno de los primeros textos medievales de cetrería*

La filosofía natural de Guillermo de Conches aplica un número restringido y común de principios básicos en la exposición de los procesos y fenómenos naturales del microcosmos (cuerpo humano) y del macrocosmos (regiones inferiores y superiores del mundo). Resalta el papel fundante de la tétrada clásica: seco y caliente (fuego), caliente y húmedo (aire), húmedo y frío (agua) y frío y caliente (tierra). Merced a las cuatro cualidades, los cuatro elementos visibles pueden transformarse unos en otros; aquéllas y otros pares de cualidades (obtuso/agudo, delgado/corpulento, móvil/ inmóvil) operaban a través de cuatro fuerzas básicas (retentiva, atractiva, digestiva y expulsiva), una idea sacada del *Pantegni*, la enciclopedia médica traducida del árabe al latín por Constantino el Africano.

En punto a anatomía y fisiología, divide en tres secciones el cerebro, sede de otras tantas facultades. La "cellula phantastica", sita en la frente, aloja la potencia intelectiva; la "cellula logistica", que ocupa el centro, contiene la potencia del discernimiento; y la "cellula memoralis", habitáculo de la potencia de la memoria, se halla en el occipucio. Localizaciones que deduce, como Solinus, de las lesiones sufridas. Reelabora más tarde esta doctrina y explica las "cellulae" por medio de las cualidades elementales; la "cellula phantastica" es caliente y seca para atraer las formas de los colores de las cosas y la "cellula memoralis" es seca y fría para retener mejor los recuerdos.

La incorporación del pensamiento clásico recuperado es plena en *Dragmaticon*. Este término es transliteración medieval del griego, donde designa la interacción dialógica entre dos personajes sin intervención del autor. Al escoger la forma de diálogo y ampliar, corregidas, la cuestiones de las que se ha ocupado hasta entonces, Guillermo se propone redactar una suerte de enciclopedia. Sustancia creada e increada, los elementos, el caos, el movimiento, mundo vivo, estrellas, círculos celestes, planetas, eclipses, meteoros, zonación de la Tierra, concepción y desarrollo son sólo una muestra de la diversidad de temas expuestos. Y lo que constituye una suerte de criterio general subyacente: el de Conches está convencido de que el mundo debe su estabilidad a los cambios equilibrados entre las partes.

Desde el siglo XII, los textos más difundidos sobre ginecología y aledaños fueron los amparados bajo el epígrafe *Trotula*, a cuyo desentrañamiento ha dedicado un decenio Monica H. Green (*Women's Healthcare in the Medieval West*). En torno a la mujer y el libro de

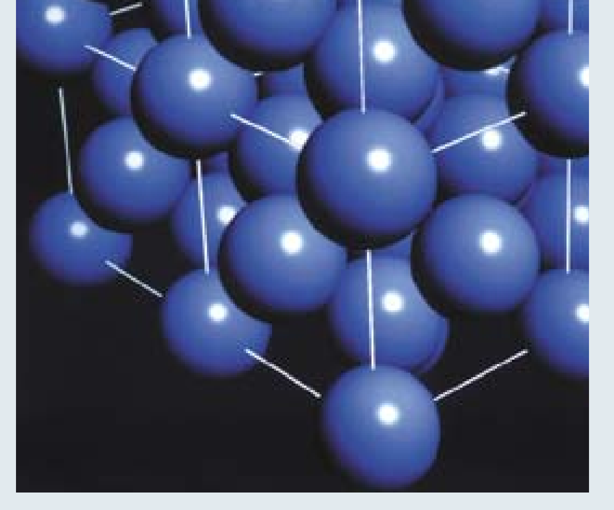
La nueva química

THE NEW CHEMISTRY, por Roald Hoffman, Glenn Seaborg, Jean Marie Lehn, David Baghurst, Guy Dewel, Ilya Prigogine, Robert Williams y otros. Coordinado por Nina Hall. Cambridge University Press; Cambridge, 2000.

El conocimiento englobado dentro de la química es amplio. Abarca el comportamiento de átomos y moléculas, desde la creación de los elementos en las estrellas hasta las complejas moléculas de los seres vivos, pasando por la síntesis de nuevas substancias extremadamente útiles.

Tras definir la química, se relata la investigación de nuevos elementos químicos, su descubrimiento, sobre todo a partir del siglo XIX, y síntesis, fundamentalmente de los transnobelios: laurencio, ruterforio, hahnio, seaborgio, bohrio, hasio, meitnerio y tres más sin nombre propio.

La teoría de los cuantos cambió completamente nuestro conocimiento del interior del átomo al aplicar la doctrina al enlace químico, a las fuerzas de unión de los átomos para formar moléculas. En este aspecto destaca la aplicación de los ordenadores para el cálculo del campo autoconsistente (SCF) de la arquitectura electrónica de las moléculas, con datos cuantitativos de la longitud y de la energía de los enlaces. De este modo se pueden trazar las curvas de nivel de un complejo activado en una reacción química, lo que nos indica la disposición estérea más conveniente para reaccionar.



El actual conocimiento del enlace entre átomos abre la posibilidad de utilizar el átomo como fuente de energía (nuclear, láser) y la posibilidad de aplicar distintos tipos de energía (luz, sonido, electricidad) para generar reacciones químicas (fotosíntesis, electrosíntesis, síntesis por ultrasonidos).

Definido el metal, el coordinador se plantea y desarrolla la importancia de los iones metálicos en la química de la coordinación, de gran trascendencia en fenómenos biológicos, como son la absorción de nitrógeno por algunas plantas y la absorción de oxígeno en la respiración de los seres vivos, en fenómenos catalíticos, como la fabricación de combustibles, polímeros, pigmentos, y, finalmente, en procesos energéticos, como en la conversión de la energía solar.

La parte dedicada a los metales termina con la química de la superficie, que va desde la protección frente a la corrosión, o degradación, hasta la lubricación para prevenir el desgaste mecánico, pasando por las distintas técnicas analíticas destinadas a la caracterización de la materia: espectroscopia microscópica de emisión, difracción de rayos X, de campo iónico, elipsometría, fotoemisión, etc.

Unos cuantos capítulos del libro se dedican a la complejidad molecular. La complejidad de las moléculas sintetizadas se ha incrementado en los últimos años, con la aparición, mediante el empleo de los catalizadores más idóneos, de la síntesis selectiva enantiomórfica: casi desaparición de isómeros inútiles. La evolución de las técnicas analíticas existentes, y la aparición de nuevos procedimientos de caracterización, permite evaluar la complejidad de algunas estructuras y la predicción de las supramoléculas, o agrupaciones moleculares de gran peso molecular formadas por un conjunto de macromoléculas unidas entre sí mediante uniones transitorias, es decir, enlaces tipo puente de hidrógeno y van der Waals. Estableciendo un paralelismo entre el átomo, la molécula y la supramolécula con la gramática, podríamos decir que el átomo equivale a la letra, la molécula se identifica con la sílaba, la macromolécula coincide con la palabra y la supramolécula se compara con la frase.

Se trata de un texto tan amplio como profundo, tan riguroso como claro, tan sencillo como esmerado, tan fácil como científico, tan comprensible como exhaustivo. Abarca los principales capítulos de la química más moderna y se nota que muchos de los autores han recibido el premio Nobel.

—PERE MOLERA

medicina acaba de extenderse en el número del año 2000 de la revista española *Dynamis*.

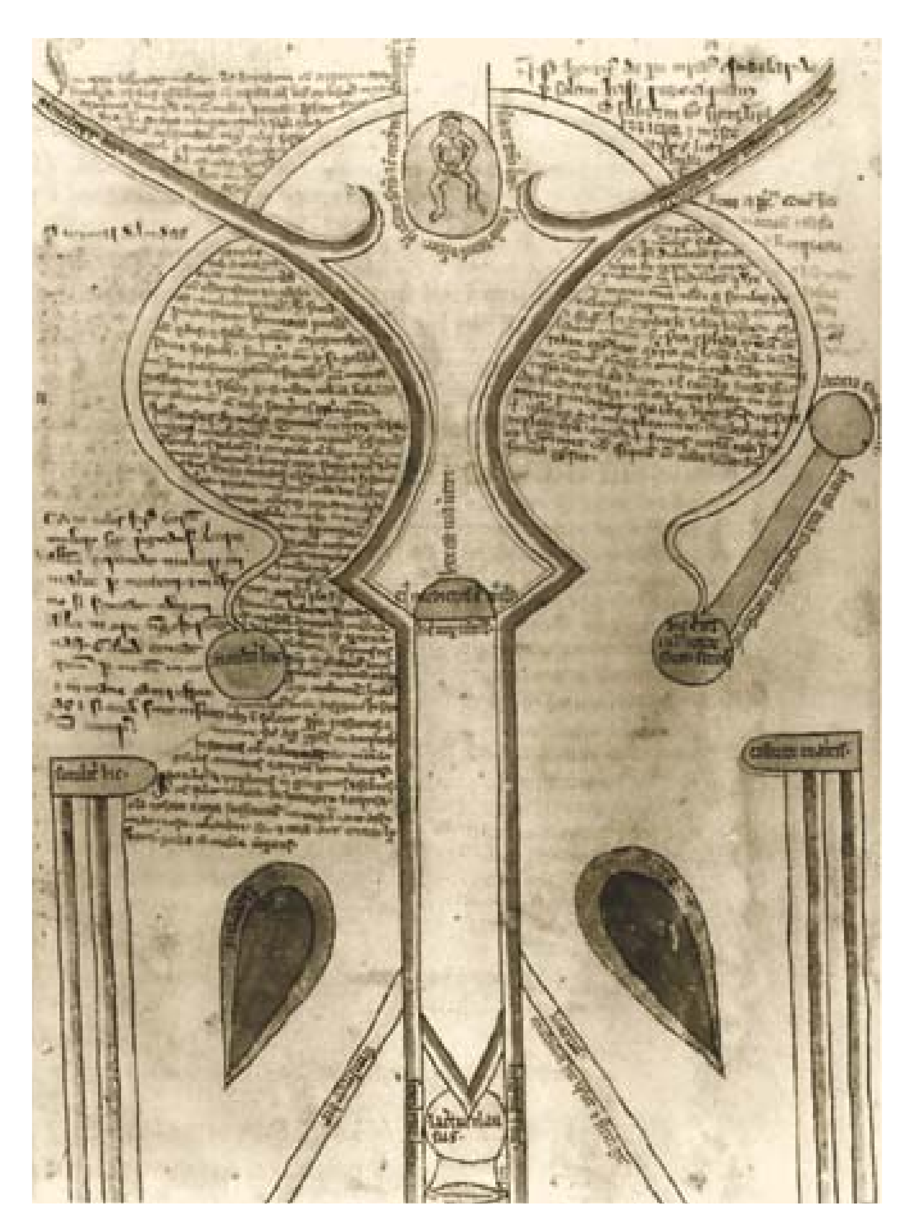
En vísperas de la fundación de las universidades, la medicina académica se consideraba una ciencia, un tipo de conocimiento cierto derivado de unos principios y demostrado por la razón. Un conocimiento que debía anclarse en los postulados generales de la filosofía natural. De acuerdo con ese criterio se conformó la *Articella*, el cuerpo doctrinal básico constituido por la *Isagoge* de Johannitius, los *Aforismos* y *Pronósticos*, de Hipócrates, y, desde mediados del siglo XII, la *Ars medicinae* o *Tegni*, de Galeno.

La mujer medieval manejaba dietarios, herbarios, extractos sobre piedras y aguas medicinales, pero su asociación con una medicina académica era harto tenue. Hubo salvedades de prestigio, como Trota de Salerno y Hildegard de Bingen, esta última excepcional también en otros campos. No parece faltarle razón a la autora cuando afirma que la historia de la atención médica desarrollada por la mujer no se ha escrito porque no puede escribirse. En sentido estricto, la sanidad no fue asunto de mujeres. Con todo, sin embargo, ni éstas circunscribían su participación a funciones secundarias, como la asistencia a partos o los remedios domésticos, ni hubo tareas médicas exclusivas del varón.

De los ensayos aquí compilados, el quinto y más extenso ("El desarrollo de la *Trotula*") constituye el embrión de la edición crítica que se promete. Se cree que en el Salerno del siglo XII se elaboraron tres textos sobre medicina de las mujeres —*Liber de sinthomatibus mulierum*, *De curis mulierum* y *De ornatu mulierum*— que ejercieron una poderosa influencia a lo largo de la Europa medieval. En un principio, cada opúsculo circuló independiente. Pero se conjuntaron a comienzos del siglo XIII bajo la denominación común de *Trotula*.

El texto que terminaría por convertirse en el *Liber de sinthomatibus mulierum* y, en última instancia, la parte más conocida del conjunto de la *Trotula*, existió primero en una forma mucho más simplificada, al parecer un borrador. Este prototexto, el *Tractatus de egritudinibus mulierum*, es una exposición llana y sumaria. Cita como autoridades a Galeno, Hipócrates, Dioscórides, Justus, Pablo y Constantino. Describe los trastornos menstruales, desplazamientos de la vagina, otras condiciones uterinas, esterilidad, contracepción, regímenes para la preñez y dificultades del parto. Inspirado principalmente en el *Viaticum* de Constantino el Africano, en los capítulos sobre los trastornos menstruales, concepción, fecundidad, contracepción y parto ese prototexto extrae recetas de un batiburrillo de materiales que corrían sueltos bajo títulos socorridos: *De causis feminarum* ("Sobre las condiciones de las mujeres") o *Liber de muliebria* ("Sobre asuntos de las mujeres"). Ayunos de sintomatología, etiología y diagnosis diferenciales, estos textos se limitan a nombrar la condición y ofrecer las instrucciones para preparar el remedio.

Lo mismo que el libro *De sinthomatibus*, el *De curis mulierum* derivaba también de otro prototexto. Presenta un carácter muy distinto del anterior. Se cubren los mismos temas de trastornos menstruales, esterilidad, etc., pero constituyen sólo una parte del amplio rango de enfermedades ginecológicas. Es el único de los tres textos que cita por su nombre varios médicos salernitanos: Magister Mathaeus Ferrarius, Magister Johannes Ferrarius, Copho; y en un caso a Trota, de la que dice que era "quasi magistra". *De ornatu mulierum*, tercer componente de lo que iba a ser *Trotula*, aparece en varias versiones distintas. La primera redacción ofrece lo que el autor dice proponerse: un tratado sucinto que resume los tratamientos sobre las mujeres en el cuidado embellecedor de su cuerpo, desde el cuidado del cabello hasta la vagina, pasando por labios, dientes y boca.



2. Diagrama del aparato reproductor femenino incluido en un manuscrito inglés del siglo XIII

La recuperación de la ciencia griega, en particular los tratados zoológicos del estagirita (*Aristotle's Animals in the Middle Ages and Renaissance*), renovó no sólo los estudios naturalistas, sino también la propia filosofía (*Was ist Philosophie im Mittelalter*?). A su abrigo nacieron tratados sistemáticos y enciclopedias, dependientes, fueran hebreos o latinos, del enfoque determinante del legado árabe, en particular, de Avicena y Averroes. Los así llamados *libros sobre animales* se vertieron del griego al árabe en la primera mitad del siglo IX, probablemente por un cristiano de lengua siríaca. En el Occidente altomedieval se conoce su contenido sólo de una manera fragmentaria e indirecta a través de adaptaciones, paráfrasis o refe-

rencias (Virgilio, Plinio, comentarios al *Hexameron*, es decir, a los seis días de la creación según el relato del *Génesis*, el *Physiologus* alejandrino y las *Etimologías* de Isidoro de Sevilla).

En torno a 1220, Michael Scot concluye en Toledo la traducción de los 19 libros *De animalibus* transmitidos por la tradición árabe. Esta colección comprendía la *Historia animalium*, el *De partibus animalium* y el *De generatione animalium*, de Aristóteles. No parece que el *Movimiento de los animales* y la *Marcha de los animales*, otros dos opúsculos aristotélicos, se tradujeran al árabe, aunque se sabía de su existencia. Entre 1230 y 1232, cuando Scot entró al servicio de Federico II, puso en latín el *Libro de las naturalezas de los animales*, un tratado incluido en la física de la *Shifa* de Avicena.

El *De partibus* y el *De generatione*, junto con el *De anima*, permitieron a los medievales tejer, con mimbres aristotélicos, una biología cuyas líneas básicas persistieron varios siglos más. Por su parte, el acceso a la inagotable información aportada por la *Historia de los animales* movió a seguir por la senda de la observación directa, purificadora de consejas y leyendas. Se trata, al comienzo, de un proceso lento que no abandona a Plinio, Solinus, el *Physiologus* y otras fuentes de la zoología tradicional, según lo corroboran las obras enciclopédicas de Bartholomaeus Anglicus, que escribe hacia 1230 *De proprietatibus rerum*, de Thomas de Cantimpré, que compone su *De rerum natura* entre 1225 y 1240, seguido unos cinco años después por el *Speculum naturale* de Vincent de Beauvois. Pero entre 1246 y 1249 Petrus Hispanus redacta ya su comentario directo al *De animalibus*.

Con todo, la versión de Scot era más una paráfrasis que una traducción. La primera traducción basada directamente sobre el texto griego la realizó, en torno a 1262-1263, Guillermo de Moerbeke, quien había residido en Tesalónica. En ésta se fundaron Tomás de Aquino y Alberto Magno (*Albertus Magnus on Animals*). Pese al esfuerzo y acierto, de Moerbeke no logró suplantar la traducción de Scot, muy difundida. Quien sí reconoció su valor fue santo Tomás, partidario firme de la distinción entre la zoología científica y el discurso figurado o simbólico sobre los animales, al que se propendía. Idea que llevará a su pleno desarrollo Alberto de Colonia; éste sincréticamente glosa la traducción de Scot y aprovecha la rica información que ha compilado Thomas de Cantimpré (viajero por Europa entera, incluida Inglaterra en busca de datos fiables). En su versión ahora al inglés, Kitchell y Resnick aclaran numerosos puntos obscuros, relativos en buena medida a la equivocidad de muchos términos ("membrana", por ejemplo) y descubriendo la intención del autor por introducir un vocabulario preciso ("solea", un tipo de pezuña).

Pero si el comentario albertiano no se detiene en desentrañar el sentido genuino del Aristóteles histórico, sino que le sirve de punto de contrastación con la observación propia, tampoco la filosofía debe ceñirse a lo que "los hombres opinaron respecto a algo, sino que debe perseguir la verdad de las cosas", subraya Tomás de Aquino. Reflejan esas palabras una posición determinante en una atmósfera enrarecida por las discusiones sobre los contenidos de la filosofía, su relación con la teología y con la ciencia empírica, es decir, la autonomía y la naturaleza del quehacer filosófico. Del interés actual de esas y otras cuestiones afines dan fe cuantitativa los 600 participantes en el X Congreso Internacional sobre Filosofía Medieval celebrado en Erfurt, en 1997, cuyas ponencias centrales se recogen en *Was ist Philosophie im Mittelalter*? El quicio de la respuesta gira en torno a la censura de 219 tesis filosóficas en la Universidad de París por Esteban Tempier en 1277.

Una cuestión central era qué entender por ciencia y su división. A menudo se abordaba en la introducción al *De caelo et mundo*. De la confusión reinante es un ejemplo Pedro de Auvernia. Puesto que, razona al uso, toda ciencia se define por su objeto, las ciencias deben definirse de acuerdo con las divisiones de los objetos. Ahora bien, un objeto del entendimiento es lo que es verdadero o lo que es; por tanto, las ciencias se distinguen de acuerdo con la división o distinción del ser. Pedro separa entidades reales de entidades de razón. Estas proceden de nuestro entendimiento y son objeto de ciencia racional; la ciencia real estudia entidades reales, que no son producto de nuestro entendimiento y que existirían aun cuando no existiese nuestro intelecto. De las entidades de razón se ocupan la lógica, la moral, la gramática y las ciencias mecánicas; consideraba ciencias reales la metafísica, la matemática y la filosofía natural.

Para ilustrar la compleja relación entre filosofía, matemática y ciencia medievales, atendamos a la noción de tiempo y su unicidad. Establecía Aristóteles que sólo había un tiempo; para ser más exactos, que los movimientos o episodios simultáneos ocurren al propio tiempo. Obvio, a primera vista. Pero, escrutado con detenimiento, advertían los medievales que no existe una forma inmediata de remitir, a un mismo tiempo de referencia, dos movimientos distintos. Para Aristóteles el tiempo es un accidente del movimiento, un número con un antes y un después. Para Averroes era real y uno. Idea en la que abundan Alberto Magno y Tomás de Aquino. En los fundamentos, sin embargo, discrepaban Richard Rufus y Roger Bacon.

A esa compleja interacción se suma la teología en el caso del continuo. Aunque hoy el continuo forma parte de la matemática, en el siglo XIV, señala Edith D. Sylla, correspondía a la física determinar las propiedades fundamentales de los continua, a la teología plantear nuevos problemas sobre la cuestión y a la lógica aportar la solución. Aristóteles define el continuum como aquello cuyas partes tienen fronteras comunes. En potencia, los continua son infinitamente divisibles. Contra esa opinión se levantaron los atomistas del siglo XIV, basados, según Sylla, en razones teológicas, vinculadas a las ideas de creación y eternidad del mundo, un viejo debate que arranca de Filopón.

LUIS ALONSO

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LA RED SEMANTICA, por Tim Berners-Lee, James Hendler y Ora Lassila

Contenidos de nuevo tipo van a desencadenar una avalancha de posibilidades que revolucionarán la Red.

RESISTENCIA ADQUIRIDA DE LOS MICROORGANISMOS, por K. C. Nicolaou y Christopher N. C. Boddy

Ante la resistencia adquirida por los microorganismos contra los antibióticos, la investigación busca nuevos fármacos que burlen esa sutil capacidad de adaptación.

EL TEST DE RORSCHACH, por Scott O. Lilienfeld, James M. Wood y Howard N. Garb

Los psicólogos usan a menudo el famoso test de manchas de tinta ideado por Rorschach, así como otros medios afines para evaluar la personalidad y los trastornos mentales; pero la investigación dice que tales pruebas en muchos casos no sirven para esos propósitos.

EXPLOTACION RACIONAL DEL PETROLEO DEL ARTICO, por W. Wayt Gibbs

El último gran yacimiento petrolífero de América podría esconderse bajo las costas de Estados Unidos. La ciencia puede dilucidar los posibles beneficios económicos y las amenazas que comporta su explotación.

AVANCES EN SISTEMAS SUBMARINOS DE DEFENSA, por Steven Ashley

Viajando dentro de burbujas reductoras de la resistencia al avance, torpedos secretos y otros sistemas navales submarinos pueden moverse a centenares de millas por hora.

EMISION DE ELECTRONES POR EFECTO CAMPO, por Pedro A. Serena, Juan José Sáenz, Antonio Correia y Tim Harper

Mediante la combinación del fenómeno de la emisión de campo con técnicas propias de la microelectrónica se han abierto camino nuevos dispositivos, desde minúsculos sensores hasta propulsores de vehículos espaciales, pasando por pantallas ultraplanas.

ENCEFALOPATIA ESPONGIFORME BOBINA (EEB) Y PRIONES, por Manfred Eigen

Los test disponibles para detectar la EEB pueden demostrar si un animal sacrificado padecía un grado avanzado de la enfermedad de las vacas locas. Sin embargo no son lo suficientemente sensibles para demostrar si una pieza de carne de venta en comercio está exenta de peligro. Nuevos ensayos basados en la velocidad de reproducción de los agentes causales de la EEB y otros priones prometen la seguridad deseada.

LA EDAD DE LAS ESTRELLAS, por Brian C. Chaboyer

Durante años hubo en cosmología lo que se llamó crisis por la edad. Se trataba de la discrepancia entre la edad del universo y la de las estrellas más viejas: aquél parecía más joven que éstas. ¿Cómo se ha resuelto esa paradoja?

